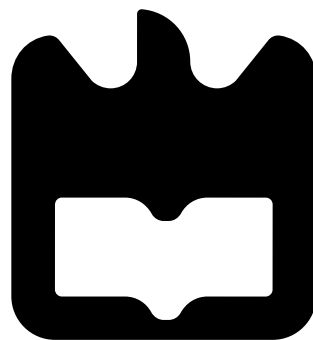




**Pedro Filipe
Melo Ângelo**

**Monitorização e Controlo Remoto de Estações de
Medição da Qualidade do Ar**





**Pedro Filipe
Melo Ângelo**

Monitorização e Controlo Remoto de Estações de Medição da Qualidade do Ar

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Alexandre Manuel Moutela Nunes da Mota, Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Mestre Rui Miguel de Bernardes Rebelo, Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações e Diretor do Departamento de Hardware na empresa Micro I/O.

O Júri / the jury

presidente / president

Prof. Doutor Paulo Bacelar Reis Pedreiras

Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Prof. Doutor Valter Filipe Miranda Castelão da Silva

Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda da Universidade de Aveiro

Mestre Rui Miguel de Bernardes Rebelo

Mestre em Eletrónica e Telecomunicações (coorientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Aos meus pais pelos seus conselhos, à minha cara-metade pelo seu apoio, à equipa da Micro I/O pela sua amizade. Por fim mas não menos importante, ao meu orientador e coorientador.

To my parents for their advice, to my better half for her support, to the Micro I/O team for their friendship. Last but not the least, to my adviser and co-adviser.

Palavras-Chave

Domótica, Internet das Coisas, Sensores, Redes sem fios, MiWi, Qualidade do Ar, Controlo, Monitorização, Aplicação Móvel

Resumo

Com o aumento das emissões de gases poluentes por todo o mundo, é evidente a necessidade de monitorizar a qualidade do ar que respiramos, tanto dentro como fora das nossas casas.

Esta dissertação descreve o processo de desenvolvimento de um sistema para monitorização e controlo de plataformas de baixo custo com múltiplos sensores, utilizada para medição de vários aspetos relacionados com a qualidade do ar, de modo a flexibilizar a sua instalação e maximizar o seu propósito. Para tal, foi estabelecida uma rede sem fios com o protocolo IEEE 802.15.4 MiWi e estabelecida conexão à Internet através do protocolo HTTP. Foi também desenvolvida uma aplicação móvel para telemóveis inteligentes Android de modo a monitorizar e controlar remotamente as plataformas. Para suportar este sistema é utilizado um Raspberry Pi como servidor com a base de dados Nimbits.

Os ensaios e testes realizados demonstram a robustez de todos os elementos do sistema e, por consequência, da sua exequibilidade e ubiquidade.

Keywords

Home Automation, Internet of Things, Sensors, Wireless Network, MiWi, Air Quality, Control, Monitor, Mobile Application

Abstract

With the increase of pollutant gas emissions around the world, it is evident the need to monitor the quality of the air we breathe, both inside and outside of our homes.

This dissertation describes the development of a system to monitor and control low-cost platforms of multiple sensors, used to measure multiple air quality aspects, to supple its installation and maximize its purpose. Thus, it was established a wireless network based on the IEEE 802.15.4 MiWi protocol, connected to the Internet through the HTTP protocol. It was also developed a mobile application for Android smartphones with the goal to remotely monitor and control the platforms. To support this system, a Raspberry Pi with the data-base Nimbits was used as a server.

The trials and test that this system went through shows the strength of all system elements and, therefore, of its practicability and ubiquity.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Motivação e objetivos	2
1.3	Estrutura do documento	2
2	Estado de Arte	4
2.1	Domótica e Internet das Coisas	4
2.1.1	Conforto	7
2.1.2	Gestão de Energia	8
2.1.3	Segurança	9
2.1.4	Observações finais	10
2.2	Qualidade de Ar	10
2.2.1	Equipamentos de medição profissionais	12
2.2.2	Equipamentos de medição não profissional	15
2.2.3	Observações finais	18
2.3	Tecnologias de comunicação para interface entre sensores	18
2.3.1	Bluetooth Low Energy	19
2.3.2	MiWi	20
2.3.3	Wi-Fi	21
3	Princípios Tecnológicos de Sensores	22
3.1	Sensores de Temperatura	22
3.1.1	Termopar	22
3.1.2	Termistor	23
3.1.3	RTD	24
3.1.4	Circuitos Integrados	25
3.2	Sensores de Humidade	25
3.2.1	Sensores Capacitivos	26
3.2.2	Sensores Resistivos	26
3.3	Sensores de Luminosidade	27
3.3.1	Foto-díodo	28
3.3.2	Foto-transistor	29
3.3.3	Foto-resistência	29
3.4	Sensores de Concentração de Gases	30
3.4.1	Sensor eletroquímico	30
3.4.2	Sensor de metal oxidado	30

3.4.3	Sensor biomimético	31
3.5	Sensores de Partículas	32
3.5.1	Sensor de ionização	32
3.5.2	Sensor fotoelétrico	32
3.6	Sensores de velocidade do vento	33
3.6.1	Anemómetro de copos	33
3.6.2	Anemómetro de hélice	33
3.7	Sensor de direção do vento	34
3.8	Sensores de Precipitação	35
4	Descrição do Sistema	37
4.1	Elementos do sistema	37
4.1.1	Plataforma de sensores	37
4.1.2	Datasink	38
4.1.3	Gateway	38
4.1.4	Servidor e base de dados	38
4.1.5	Aplicação móvel	39
4.2	Modo de funcionamento	39
4.2.1	Tramas de comunicação entre plataforma e Datasink	39
4.2.2	Tramas de comunicação entre Datasink e Gateway	40
4.2.3	Tramas de comunicação de acesso à base de dados	41
4.3	Funcionalidades da aplicação móvel	44
5	Detalhes de Desenvolvimento do Sistema	47
5.1	Escolha do protocolo de interface entre micro-controladores	47
5.2	Micro-controladores	48
5.2.1	Micro-controlador como Gateway	49
5.2.2	Micro-controlador como Datasink	51
5.3	Servidor e base de dados	52
5.4	Aplicação móvel	53
5.5	<i>Smartphone</i>	56
5.6	Ferramentas de desenvolvimento	56
6	Resultados Experimentais	57
6.1	Alcance prático entre módulos μ MRF	57
6.1.1	Alcance exterior não urbano	57
6.1.2	Alcance exterior urbano	57
6.1.3	Alcance interior	58
6.1.4	Observações finais	59
6.2	Análise de Resultados	61
6.2.1	Ensaio Interior	61
6.2.2	Ensaio no Exterior	67
6.3	Estudo energético de um nó	71
6.4	Análise de Custos	73

7 Conclusão e Trabalho Futuro	74
7.1 Conclusão	74
7.2 Trabalho futuro	74
Referências	76
Anexo A: Identificação dos elementos do sistema na implementação real	88
Anexo B: Linhas de tendência dos sensores	90

Lista de Figuras

2.1	Nest Learning Thermostat. [32]	7
2.2	Stack Lighting Alba. [34]	8
2.3	WeMo Insight Switch [37]	8
2.4	Efergy Engage Hub kit [38]	9
2.5	Scout Alarm [42]	10
2.6	Alima [59]	15
2.7	Nest Protect [61]	16
2.8	Roost Smart Battery [64]	16
2.9	Wally [66]	17
2.10	Modelo OSI da IoT (retirado de [72])	18
3.1	Termopar K ou T (Retirado de [93])	23
3.2	Termistor NTC (Retirado de [96])	24
3.3	P0K1 (Retirado de [98])	24
3.4	LM35DZ (Retirado de [100])	25
3.5	P14 FemtoCap (Retirado de [103])	26
3.6	HCZ-D5-A (Retirado de [104])	27
3.7	Espectro da Radiação Eletromagnética (Retirado de [108])	27
3.8	Resposta fotópica do olho humano (Retirado de [111])	28
3.9	Foto-díodo ISL (Retirado de [112])	29
3.10	Fototransistor Vishay TEPT4400 (Retirado de [114])	29
3.11	VT90N2 LDR (Retirado de [117])	30
3.12	Nemoto NAP505 (Retirado de [121])	31
3.13	e2V MiCS-2614 [124]	31
3.14	Quantum Eye CO Detector. (Retirado de [128])	32
3.15	PM Sensor PPD42NS (Retirado de [134])	33
3.16	ADS-WS1 anemometer (Retirado de [139])	34
3.17	Marine Wind Monitor - 05106 (Retirado de [141])	34
3.18	Marine Wind Monitor - 05106 (Retirado de [139])	35
3.19	ADS-WS1 Rain Gauge, Argent Data Systems (Retirado de [139])	36
3.20	ADS-WS1 Weather Station (Retirado de [140])	36
4.1	Diagrama de Blocos do Sistema	37
4.2	Estrutura de rede do sistema	39
4.3	Estrutura da trama de comunicações da plataforma de sensores.	39
4.4	Exemplo de troca de mensagens entre Datasink e a plataforma de sensores.	40

4.5	Aspeto gráfico da base de dados	44
4.6	Fragmento de configuração da aplicação móvel.	45
4.7	Aviso 1.	45
4.8	Aviso 2.	45
4.9	Fragmento de monitorização da aplicação móvel.	45
4.10	Janela de configuração da data.	46
4.11	Janela de configuração da hora.	46
4.12	Fragmento de controlo da aplicação móvel.	46
4.13	Fragmento sobre a aplicação.	46
5.1	Fluxograma do <i>firmware</i> Gateway.	49
5.2	Estruturas de dados no Gateway.	50
5.3	Esquema do circuito de controlo da alimentação da plataforma.	52
5.4	Circuito de controlo da alimentação da plataforma.	53
5.5	Fluxograma da aplicação móvel.	54
6.1	Mapa dos componentes principais no ensaio urbano.	58
6.2	Mapa dos componentes principais no ensaio interior.	58
6.3	Evolução do RSSI no tempo e distância - Exterior Não Urbano.	59
6.4	Evolução do RSSI no tempo e distância - Exterior Urbano.	60
6.5	Evolução do RSSI no tempo e distância - Interior.	60
6.6	Ensaio Interior - Temperatura	61
6.7	Ensaio Interior - Humidade	62
6.8	Ensaio Interior - Concentração de CO e aplicação do filtro	63
6.9	Ensaio Interior - Concentração de CO filtrado ($\alpha = 0.04$)	63
6.10	Ensaio Interior - Concentração de NO ₂	64
6.11	Ensaio Interior - Concentração de O ₃	64
6.12	Ensaio Interior - Luminosidade.	65
6.13	Ensaio Interior - Luminosidade (pormenor).	65
6.14	Ensaio Interior - Número de Partículas (tamanho superior a 2.5 μm)	66
6.15	Ensaio Interior - Número de Partículas (tamanho entre 1 e 2.5 μm).	66
6.16	Ensaio Interior - RSSI	67
6.17	Ensaio Interior - LQI	67
6.18	Ensaio Exterior - Direção do vento	68
6.19	Ensaio Exterior - Velocidade do vento	68
6.20	Ensaio Exterior - Temperatura	69
6.21	Ensaio Exterior - Humidade	69
6.22	Ensaio Exterior - Monóxido de Carbono	69
6.23	Ensaio Exterior - Luminosidade	69
6.24	Ensaio Exterior - Dióxido de Azoto	69
6.25	Ensaio Exterior - Ozono	69
6.26	Ensaio Exterior - PM _{2.5}	70
6.27	Ensaio Exterior - PM ₁₀	70
6.28	Ensaio Exterior - RSSI	70
6.29	Ensaio Exterior - LQI	70
6.30	Consumo de corrente de um nó	71

7.1	Instalação da Plataforma de Sensores.	88
7.2	Micro-controlador como Gateway.	89
7.3	Resposta do sensor.	90
7.4	Resposta do sensor.	91
7.5	Resposta do sensor.	92

Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa de equipamentos de medição.	14
3.1	Características (Adaptado de [96])	24
3.2	Características (Adaptado de [98])	24
3.3	Características (Adaptado de [100])	25
3.4	Características (Adaptado de [103])	26
3.5	Características (Adaptado de [105])	27
3.6	Unidades: Radiometria vs Fotometria (Adaptado de [109])	28
3.7	Características (Adaptado de [113])	29
3.8	Características [114]	29
3.9	Características [117]	30
3.10	Características [121]	31
3.11	Características [124]	31
3.12	Características [134]	33
3.13	Características [140]	34
3.14	Características [141]	34
3.15	Características [139]	35
3.16	Características [139]	36
4.1	Sensores disponíveis na plataforma da Micro IO	38
5.1	Comparação de módulos das três tecnologias	48
5.2	Tabela de cálculos	55
6.1	Conversão do RSSI médio dos três ensaios	59
6.2	Componentes chave e custo unitário	73

Acrónimos

AC Alternating Current

ARPANET Advanced Research Projects Agency Network

GPS Global Positioning System

GSM Global System for Mobile Communications

HTTP Hypertext Transfer Protocol

HVAC Heating, Ventiglating, and Air Conditioning

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT Internet of Things

IFTTT If This Then That

I/O In / Out

LCD Liquid Crystal Display

LED Light Emitting Diode

MITS Micro Instrumentation Telemetry System

PIR Passive Infrared Sensor

PLC Power Line Communications

PM Particulate Matter

RAM Random Access Memory

RFID Radio Frequency Identification

SNMP Simple Network Management Protocol

TFT Thin Film Transistor

TCP/IP Transmission Control Protocol/Internet Protocol

WSN Wireless Sensor Network

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A constante evolução da tecnologia, especialmente em aspetos como diminuição do tamanho e aumento da capacidade de processamento de sistemas computacionais, diminuição do preço de sensores e atuadores e o desenvolvimento de tecnologias de comunicação sem fios, permite hoje em dia a expansão da ideia “Internet das coisas” (*IoT - Internet of Things*), onde todos os objetos têm a possibilidade de fornecer e/ou receber dados numa rede e desta forma potenciar as possibilidades de interação humano-máquina e máquina-máquina na mesma rede. O controlo remoto de aparelhos domésticos, automatização da iluminação, gestão de energia e a informação fornecida por estes componentes são um exemplo da interação de pessoas e de máquinas, criando uma casa inteligente que fornece um ambiente de maior segurança, comodidade e comunicação. Esta interação pode ser reforçada com o aumento da quantidade de dados partilhados desde que adaptados ao ambiente em que as “coisas” se inserem.

No entanto, outras preocupações surgem para além do conforto que uma casa inteligente possibilita. A qualidade do ar que respiramos levanta preocupações, não só em locais públicos mas também nas nossas próprias casas. A situação piora tendo em conta que a tendência atual é o crescimento das zonas urbanizadas e segundo sugerem as Nações Unidas, 66% da população mundial estará a viver numa cidade no ano de 2050, face aos 54% no ano de 2014 [1].

A monitorização oficial da qualidade do ar em Portugal é levada a cabo, maioritariamente, por estações fixas. Em 2010 existiam, em locais estratégicos, 24 estações no Norte, 9 no Centro, 26 na zona de Lisboa e Vale do Tejo, 6 no Alentejo e 6 no Algarve [2]. Estas estações são dispendiosas devido à tecnologia utilizada, certificada e rigorosamente regulada, o que acaba por limitar a sua aplicação em grande número. Adicionalmente, estas estações utilizam métodos de comunicação por ligação direta via telefone e apenas em 2010 foi considerado o uso de um sistema GPRS (*General Packet Radio Service*) para recolha de dados [2]. O mesmo método continuaria a ser utilizado em 2012 [3].

Por estas razões e com o objetivo de ajudar a perceber melhor como o fenómeno da poluição do ar nos afeta a nível pessoal, nas nossas casas, escolas e locais de trabalho, a empresa de desenvolvimento de soluções e serviços de hardware e software Micro I/O desenvolveu uma plataforma de sensores de baixo custo e baixo consumo. Para que esta plataforma tenha o maior impacto possível, esta deve ser robusta, pequena e móvel, flexível na sua aplicação e ubíqua na sua utilização.

1.2 Motivação e objetivos

Uma das preocupações mundiais da atualidade é a poluição, quando interligada com saúde e ambiente. Por consequência, é de grande importância a monitorização da qualidade do ar em zonas de grande presença humana. Os espaços públicos, tanto abertos como fechados e o próprio espaço privado, são os de maior interesse devido aos diferentes poluentes encontrados em cada ambiente. Esta monitorização não será apenas importante para calcular a qualidade de vida dentro de uma cidade mas também poderá ser utilizada para diversos estudos interdisciplinares que relacionem a poluição com outros indicadores da vida citadina e quotidiana.

É objetivo desta dissertação o desenvolvimento de um sistema de apoio à plataforma de sensores desenvolvida pela Micro I/O que forneça:

- uma base de dados para guardar os valores adquiridos;
- comunicação bidirecional sem fios com um coordenador de rede com acesso à Internet;
- uma aplicação Android para tornar móvel a sua monitorização e controlo.

A comunicação entre a plataforma e a base de dados será feita através da instalação de uma rede tipo malha com o protocolo MiWi (baseado no standard IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.15.4) da Microchip com o uso de micro-controladores. O coordenador desta rede, através de outro interface de rede (pedidos HTTP (*HyperText Transfer Protocol*), com acesso à Internet), poderá enviar e receber informação da base de dados instalada num servidor. Para uma verdadeira inserção da plataforma na Internet das Coisas, a aplicação Android tem como objetivo a visualização dos dados armazenados, tanto da última leitura efetuada, como de um historial de cada sensor. Deve também fornecer opções de controlo da plataforma.

1.3 Estrutura do documento

A presente dissertação está dividida em 7 capítulos: Introdução, Estado de Arte, Princípios Tecnológicos, Descrição do Sistema, Aspetos de Desenvolvimento do Sistema, Resultados Experimentais, Conclusão e Trabalho Futuro.

O primeiro capítulo descreve e enfatiza a importância, na atualidade, de monitorizar a qualidade do ar em zonas urbanas com plataformas de sensores de baixo custo, assim como tornar a sua aplicação flexível e ubíqua com um sistema de apoio robusto.

De seguida, no Estado de Arte, é apresentada a evolução dos três conceitos de relevo presentes neste trabalho: Domótica e Internet das Coisas, Qualidade do Ar e Tecnologias de Comunicação para interface entre sensores. São também analisadas, no âmbito da medição da qualidade do ar, soluções que o mercado oferece, de índole profissional e não-profissional.

No terceiro capítulo, Princípios Tecnológicos, são descritos os principais conceitos teóricos utilizados na construção e funcionamento de sensores.

O quarto capítulo apresenta a arquitetura do sistema desenvolvido, designadamente dos elementos individuais e o seu modo de ligação, assim como as funcionalidades da aplicação móvel.

No capítulo quinto é descrito, de uma forma mais detalhada, o funcionamento dos elementos apresentados no capítulo anterior. São também indicadas todas as ferramentas, sejam elas

de hardware, software ou *firmware* de terceiros, utilizadas em todo o processo do desenvolvimento.

No sexto capítulo são apresentados e analisados os testes realizados ao sistema, assim como as conclusões que se podem retirar dos mesmos.

Por fim, no capítulo sétimo, o trabalho realizado nesta dissertação é analisado. São sugeridas propostas futuras que permitam o aperfeiçoamento e a continuidade do sistema desenvolvido.

Capítulo 2

Estado de Arte

2.1 Domótica e Internet das Coisas

A domótica nasceu primeiramente da imaginação e ficção do Homem, apenas para mais tarde se tornar realidade através de pequenos passos evolutivos ao longo de décadas. Com origem na palavra francesa *Domotique*, domótica vem da palavra latina *domus*, que significa casa, e informática [4, 5]. Na atualidade, pode ser entendida como a ligação de dispositivos, máquinas e objetos de uma casa a um sistema computacional central que recebe e processa informação. Através desses dados, é possível a monitorização, controlo e automatização do ambiente doméstico e desta forma obter eficiência energética, conforto, entretenimento e segurança.

Os eletrodomésticos, por definição, podem ser considerados como as primeiras máquinas de automatização para uso doméstico: essencialmente, uma máquina de lavar roupa automatiza a limpeza de tecidos, assim como uma máquina de lavar louça o faz para utensílios de cozinha e de forma análoga para os restantes eletrodomésticos que se possam encontrar numa habitação. Os eletrodomésticos surgiram na primeira metade do Século XX e alguns exemplos são [6, 7]: o primeiro aspirador elétrico de utilização prática em ambientes domésticos, inventado por James Spangles em 1907; a primeira máquina de lavar roupa, inventada em 1908 por Alva Fisher e introduzida no mercado pela Hurley Machine Company of Chicago; a primeira tostadeira elétrica com sucesso comercial, D-12, surgiu no ano de 1909, patenteada por Frank Shailor da General Electric; o primeiro frigorífico para casas, inventado por Fred W. Wolf em 1913; a primeira máquina de lavar louça é comercializada, produzida pelos irmãos Walker, no mesmo ano.

O primeiro sistema de controlo doméstico foi desenvolvido em 1966 e 67, o *Electronic Computing Home Operator* ou ECHO IV, por um engenheiro da Westinghouse Corporation, Jim Sutherland [8]. Na casa do seu construtor, o ECHO IV ocupava grande parte da cave e tinha a capacidade de automatizar ou assistir algumas funções domésticas, tais como cálculos financeiros familiares, guardar informações como receitas de cozinha, reproduzir listas de compras, controlar a temperatura da casa e ligar/desligar eletrodomésticos. Não existe nenhum indício que este produto tenha vendido uma única unidade, talvez devido ao seu alto custo e necessidade de um elevado conhecimento técnico (programação) para a sua utilização [9].

Com a introdução dos micro-controladores na década de 70, o controlo digital surgiu com bastante relevo devido ao baixo custo de implementação desta tecnologia, o que permitiu o desenvolvimento da primeira calculadora de um único chip em 1971 por diversas empresas,

Intel e Texas Instruments entre elas [10]. Apenas em 1975 se viu o primeiro computador com adesão comercial significativa, o Altair 8800 apelidado como “*personal computer*”, com um processador Intel 8080 de 2,0 MHz e 256 bytes de RAM (*Random Access Memory*) (extensíveis até 64 KB). Este computador, introduzido no mercado no mês de Janeiro pela empresa MITS (*Micro Instrumentation Telemetry Systems*) teve um número estimado de vendas superior a 2000 unidades [11]. Também neste ano, a empresa Pico Electronics desenvolveu o protocolo X10, o seu décimo projeto [12]. Este protocolo tinha como objetivo a transmissão de informação através de linhas elétricas, tecnologia hoje conhecida como PLC (*Power Line Communications*). Os primeiros produtos foram comercializados em 1978 e tornaram-se bastante populares nos anos seguintes, atingindo o seu auge no final da década 90. Um terço dos utilizadores da Internet, tinha um destes produtos e o *website* da X10 era o quarto mais visitado.

Nos finais da década 90, a Internet introduziu-se intrinsecamente no quotidiano de grande parte da população [13], o que veio mudar o paradigma da domótica. O termo Internet das Coisas foi talvez utilizado pela primeira vez por Kevin Ashton como título de uma apresentação sobre a utilização de etiquetas RFID (*Radio Frequency IDentification*) em linhas de produção, na empresa Procter & Gamble no ano de 1999 [14]. O termo surgiu da interligação entre as etiquetas RFID e uma Internet em ampla expansão. No entanto, a ideia de interligar pessoas com pessoas, pessoas com objetos, e por fim objetos com objetos surgiu muito antes da Internet [15]. Em 1946, a famosa banda desenhada americana de Chester Gould, Dick Tracy, apresentou ao mundo do desenho animado a utilização de rádios de comunicação bi-direcional [16]. Em 1948 a ideia de códigos de barras é desenvolvida por Norman Joseph e Bernard Silver, sendo o pedido da primeira patente da tecnologia arquivada no ano seguinte [17]. Em 1955, o primeiro “computador” portátil, não mais do que um dispositivo analógico do tamanho de um *smartphone* atual, é utilizado para fazer batota em jogos de roleta através de algoritmos preditivos [18]. O nascer da Internet acontece no ano de 1969 com a primeira mensagem via ARPANET (*Advanced Research Projects Agency Network*) [19]. Em 1982, David Nichols, Mike Kazar, John Zsarnay, e Ivor Durhamum, um grupo de estudantes da Universidade de Carnegie-Mellon, Pittsburgh, EUA (Estados Unidos da América), frustrados com viagens e tempo desperdiçados sempre que queriam ir buscar uma lata de refrigerante à máquina de venda automática e a encontravam ou vazia, ou com a bebida quente, decidiram criar um sistema que os ajudasse nesta situação [20]. *Micro-switches* foram instalados em todas as prateleiras da máquina e ligados ao computador central do departamento, o que permitia calcular a quantidade de latas que a máquina tinha, há quanto tempo estavam lá e em que prateleira se localizavam. Para completar esta solução, era possível aceder a esta informação pelo serviço *finger* da ARPANET, “finger coke@cmua”, através de qualquer computador da rede local da universidade.

O primeiro eletrodoméstico ligado à Internet pertence a John Romkey, que inventou uma tostadeira capaz de ser ligada e desligada pela web, em 1990 [21]. O dispositivo estava ligado a um computador por TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), utilizando SNMP (*Simple Network Management Protocol*) para a gestão de rede e uma base de dados MIB (*Management Information Base*) associada. Esta tostadeira foi apenas criada para demonstrar a ubiquidade do protocolo IP (*Internet Protocol*), visto que a principal função do dispositivo, a de tostar pão, continuava bastante manual. É também no final desta década e no início do segundo milénio que surgiam diversos protótipos de frigoríficos com ligação à Internet. Por exemplo, a Junho de 2000, a LG Electronics lançou o “Internet Digital DIOS”. Este frigorífico,

dotado de um ecrã TFT LCD (*Thin Film Transistor Liquid Crystal Display*) de 15.1 polegadas, seria capaz de fazer compras online, vídeo-chamadas, trocar *e-mails* e transmitir programas televisivos [22]. No entanto, esta linha de produtos não teve sucesso comercial significativo devido, principalmente, a três razões [23]:

- Preço exorbitante;
- Funcionalidades limitadas e ambíguas, no sentido em que a junção de um computador a um frigorífico não melhorava nenhum serviço que outras ferramentas ofereciam (tanto eletrónicas como uma simples folha papel e íman para a segurar à porta);
- Diferenças no ciclo de vida do frigorífico e do computador, onde o primeiro não necessita de renovação durante longos anos e o segundo é atual apenas durante alguns meses.

Outro aspeto bastante relevante na entrada do século XXI foi o rápido desenvolvimento tecnológico de comunicações sem fios. Entre estes desenvolvimentos destaca-se a ascensão de WLANs (*Wireless Local Area Network*), com a norma IEEE 802.11 (inicialmente com a variante b), também conhecido como Wi-Fi, que se tornou dominante sobre outros standards [24]. É também nesta altura que surge um grande interesse em investigação e desenvolvimento em WSN (*Wireless Sensor Networks*), o que promoveu a criação de protocolos com o objetivo de otimizar a eficiência energética para esta aplicação específica. Evidência disso foi a organização de vários consórcios entre empresas poderosas, como por exemplo: Wi-Fi Alliance [25] em 1999, Zigbee Alliance [26] em 2002, Z-Wave Alliance [27] em 2005. A CISCO Systems [28], empresa conhecida pelos seus produtos e serviços relacionados com telecomunicações, calcula o nascimento da Internet das Coisas algures entre 2008 e 2009 pelo rácio entre número de “coisas ou objetos” ligados à Internet e o número de pessoas habitantes do nosso planeta [29].

Atualmente, o termo Internet das Coisas representa uma ideia concreta, se bem que com definições variadas e em perpétuo desenvolvimento. Constantine A. Valhouli, do grupo Hammersmith [30], uma empresa renomeada de consultoria de construção civil e tecnológica, explica o termo num trabalho de pesquisa [31]:

“A Internet das Coisas compreende uma sobreposição de informações sobre o mundo físico. Objetos e locais tornam-se parte da Internet das Coisas através de duas maneiras. Informação pode ser associada a uma localização específica com o uso de coordenadas GPS (*Global Positioning System*) ... Alternativamente, sensores e transmissores embutidos em objetos permitem que estes objetos possam ser endereçados por protocolos de Internet, de sentir e reagir ao seu ambiente, assim como comunicar com outros utilizadores ou outros objetos”.

Já a Cisco Systems defende que [31]:

“a Internet das Coisas é uma rede de objetos físicos acessíveis pela Internet ... estes objetos contêm tecnologia embutida para interagir com estados internos ou com o ambiente exterior. Por outras palavras, quando objetos conseguem sentir e comunicar, há uma mudança na maneira de como e onde as decisões são feitas, e de quem as faz”.

Existe, portanto, uma transferência da tecnologia da IoT para o mercado atual da domótica: uma das principais tendências é a de produtos com existência virtual na Internet. Outra tendência relevante é a procura por dispositivos *plug-and-play*, ou seja, que não necessitem

de instalação profissional: que estão prontos a funcionar após uma rápida e fácil instalação. Seguidamente são apresentados exemplos relevantes nas principais áreas deste mercado que comprovam estas tendências.

2.1.1 Conforto

O conforto que uma casa inteligente pode oferecer, hoje em dia, passa obrigatoriamente pelo controlo ambiental interior, ou HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*) e iluminação. Nesta área destacam-se dois produtos: o Nest Learning Thermostat e Stack Lighting Alba.

Nest Learning Thermostat [32]



Figura 2.1: Nest Learning Thermostat. [32]

O Nest é um termostato que controla o sistema HVAC de uma divisão. Contem sensores de temperatura, humidade, luz ambiente e atividade. Os sensores de temperatura e humidade são utilizados na principal funcionalidade de controlo ambiental. O sensor de luz ambiente é utilizado no ajuste da iluminação do ecrã do dispositivo. Os sensores de atividade são utilizados para detetar atividade na divisão, o que permite que o termostato desligue automaticamente o sistema HVAC numa divisão vazia.

Uma funcionalidade importante deste dispositivo é o seu algoritmo de aprendizagem. Com o controlo manual do termostato, o algoritmo é capaz de reconhecer padrões de utilização e adaptar-se à atividade da divisão onde foi instalado.

A comunicação sem fios deste dispositivo é compatível com os protocolos Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n de 2.4 e 5GHz, IEEE 802.15.4 a 2.4GHz e Bluetooth Low Energy. Com uma aplicação móvel (Android e iOS) e conexão à Internet é possível controlar o dispositivo tanto dentro como fora de casa. A aplicação também é utilizada para notificações e lembranças relacionadas com o termostato, como por exemplo alertas de temperaturas perigosas (altas ou baixas) ou aviso para substituição de filtros.

A utilização deste termostato, segundo a empresa Nest, é capaz de poupar no consumo elétrico em média 10 a 12 % no aquecimento e 15 % no arrefecimento de uma casa.

Stack Lighting Alba [33]

Com muitas semelhanças com o Nest Thermostat, as lâmpadas inteligentes LED (*Light Emitting Diode*) da Stack Lightning oferecem funcionalidades semelhantes, inclusive a troca de informação entre os dois produtos. Esta lâmpada usa sensores de atividade para controlar o estado do dispositivo, o que possibilita a sua utilização sem recurso a interruptores. Estes

sensores são também utilizados para, no estado “*Away*” (ninguém esta em casa), alertar o utilizador pela aplicação móvel que movimento foi detetado. Com sensores de luminosidade, a Alba regula a intensidade de luz que emite e deste modo diminui o consumo energético. Esta lâmpada é também capaz de adaptar-se automaticamente através da aprendizagem de padrões de utilização.

Através de uma aplicação móvel, é possível o controlo e ajuste da temperatura de cor emitida pela lâmpada, desde tons azulados para cores frias a tons amarelos para cores quentes. É também possível estabelecer horários fixos de utilização. Outra funcionalidade relevante é o “*Home Sitting*” que, em períodos longos de ausência do utilizador da sua casa, as lâmpadas imitam uma utilização normal de iluminação na casa, prevenindo desta forma assaltos.

Para a utilização deste produto é necessário um *hub* que faz papel de Gateway entre a Internet através de Wi-Fi e Zigbee (baseada também no IEEE 802.15.4) para a lâmpada [35].



Figura 2.2: Stack Lighting Alba. [34]

2.1.2 Gestão de Energia

A gestão de consumo elétrico é um tema intrínseco na domótica atual, sendo que na grande maioria dos produtos, uma das principais funcionalidades é a melhoria da eficiência energética, como foi possível observar nos dois produtos apresentados anteriormente. Não obstante, existem no mercado dispositivos para monitorizar e analisar o consumo energético de uma casa, seguidamente apresentados.

WeMo Insight Switch [36]

Este dispositivo, da Belkin, é utilizado para monitorizar o consumo de energia dos aparelhos elétricos que alimenta. Através de uma conexão Wi-Fi e uma aplicação móvel, é possível estabelecer horários de utilização, personalizar notificações, ligar ou desligar o WeMo Switch e monitorizar os gastos energéticos.



Figura 2.3: WeMo Insight Switch [37]

Efergy Engage Hub

A Efergy é um produtor internacional de tecnologias para monitorização de energia [38].

O produto mais interessante desta empresa, no âmbito deste trabalho, é o Engage Hub. Este dispositivo é composto por um sensor, transceptor, *hub* e plataforma.

O sensor liga-se diretamente aos cabos de alimentação da rede elétrica da casa. Tem capacidade de medição entre 50 mA a 120A com uma gama de tensão entre 90 a 600V AC (*Alternating Current*).

O transceptor é utilizado para estabelecer uma comunicação sem fios entre o *hub* e o sensor para que haja troca de informação. Esta comunicação acontece a cada 6, 12 ou 18 segundos, tem um limite de 70 metros e utiliza a frequência de 433 MHz. O transceptor tem ainda uma bateria alcalina de 2400 mAh, com vida mínima de 12 meses [39].

Por sua vez, o *hub* tem acesso à Internet através da rede local (por cabo Ethernet), o que permite o envio de dados para a plataforma da Efergy. A observação, em tempo real, do consumo energético pode ser feita nesta plataforma, na forma de custo monetário, kWh (consumo de potência elétrica) ou CO₂ e com recurso a um computador ou por uma aplicação móvel. É também possível obter relatórios de consumos e médias diárias, semanais e mensais.



Figura 2.4: Efergy Engage Hub kit [38]

2.1.3 Segurança

Scout Alarm

O Scout Alarm é um conjunto de dispositivos, centralizados num *hub*, que constituem um sistema de segurança flexível na medida em que é o utilizador que escolhe quais os equipamentos que quer utilizar e quando é que os adquire, consoante a sua necessidade ou capacidade financeira.

O único elemento obrigatório é o Scout Hub [40], a unidade de processamento do sistema que cria e gere uma rede com topologia em malha, com o protocolo Zigbee, com os restantes sensores e estabelece uma comunicação com a Internet. O *hub* está equipado com bateria que, aliado à utilização de um módulo 3G, oferece uma linha de comunicação secundária no caso de falha de Internet ou energia. Contém também uma sirene de 106 dB para alarme sonoro.

Para os restantes elementos do sistema, a Scout Alarm oferece vários tipos de sensores, todos eles com módulo de comunicação sem fios e bateria:

- Sensores de movimento PIR (*Passive Infrared Sensor*) - até 7.5 metros, cobertura de 90°;
- Painéis de acesso - controlo de portas para acesso interior. Identificação por etiqueta RFID e porta-chaves. Desarme e rearme do sistema;
- Sensores de portas e janelas - controlo do estado de portas e janelas (abertas ou fechadas);
- Aplicação móvel - controlo e monitorização do sistema completo, tais como recebimento de notificações, desarme de falsos alarmes pela identificação exata do sensor disparado e ações com base em localização ou contexto.

Este produto tem a possibilidade de ser monitorizado pelo próprio utilizador final ou este pode optar por um serviço de vigilância 24h, 7 dias da semana, certificado e profissional.

Adicionalmente, este produto é compatível com os dispositivos Nest e canais IFTT (*If This Then That*) [41], o que permite um grande leque de ações personalizadas.



Figura 2.5: Scout Alarm [42]

2.1.4 Observações finais

Como observado neste subcapítulo, a tendência atual no mercado da domótica não se caracteriza pelo melhoramento das especificações de cada produto mas sim na implementação da Internet das Coisas, o que permite a criação de uma vasta gama de novas funcionalidades.

Como evidenciado em [84] e [85], o facto desta tendência ser relativamente nova provoca, do ponto de vista do consumidor, uma dificuldade bastante significativa, que é a existência de uma grande variedade de protocolos de comunicação. Este paradigma tem como resultado final a incompatibilidade entre produtos, o que se traduz, principalmente, em dezenas de diferentes aplicações - no pior caso, uma para cada dispositivo - e um potencial limitado pela falta de comunicação entre todos e cada um dos dispositivos, inclusive diferentes produtos que utilizem o mesmo protocolo.

Para contornar estes dois problemas, as soluções atuais são algo limitadas. Uma possível resolução é a procura de dispositivos que utilizem o mesmo protocolo, o que resolve apenas um obstáculo, pois a maior parte dos produtos continuam sem comunicar entre si. Esta solução também limita grandemente a escolha do consumidor. Uma segunda hipótese é a compra de um serviço profissional, que resolve as duas dificuldades mas tem a grande desvantagem de ser extremamente dispendioso. Outra possível solução, talvez a mais viável neste momento, passa pela utilização de ferramentas adicionais para gestão dos diferentes protocolos e comunicação entre dispositivos. Um bom exemplo é o SmartThings Hub, compatível com Z-Wave, ZigBee, Wi-Fi e dispositivos com endereço IP [86]. Finalmente, de modo a estabelecer comunicação entre dispositivos, existe o serviço, grátis, do IFTTT. Com este serviço, através de receitas simples, é possível estabelecer regras e ações quando acontecem determinados eventos [87].

A domótica sempre foi uma área que apenas era acessível a um número limitado de pessoas durante muitas décadas. A evolução tecnológica recente permite agora uma aproximação, tanto modular como rentável, a um maior conjunto diferenciado de pessoas.

2.2 Qualidade de Ar

O advento da Internet das Coisas veio, naturalmente, mudar o paradigma da monitorização, tanto dentro como fora de casa, da poluição e qualidade do ar.

A poluição é uma grande preocupação da humanidade. Existem indícios da poluição ser um problema de dimensão mundial há 2000 anos atrás, altura em que o Império Romano e a dinastia Han chinesa produziam quantidades de metano em quantidade suficiente para que a concentração deste gás a nível mundial tenha variado consideravelmente [43]. Esta fonte

de metano tinha origem, no caso dos Romanos, nos excrementos de animais de pecuária; no caso da China, no aumento dos campos de arroz (que tem como produto secundário um tipo de bactéria que produz metano); e, no caso de ambos, da atividade metalúrgica da fabricação de armas. Outras repercussões da poluição ao longo da História podem também ser evidenciadas pelo grande número de epidemias e doenças [44]. Exemplo disso foi a difusão de pandemias de cólera e tifoide no império Romano, onde estas doenças alastravam-se pela água poluída com dejetos humanos. Com a Revolução Industrial, a utilização de carvão tornou-se a principal fonte de energia, desde atividades industriais, à sua utilização doméstica. Esta situação levou à precipitação de chuvas ácidas, formadas pela libertação dos gases Dióxido de Enxofre (SO_2), Óxido de Azoto (NO) e Dióxido de Carbono (CO_2) resultantes da combustão de combustíveis fósseis. Os “*smogs*” (junção de “*smoke*” e “*fog*”, que significa respetivamente fumo e nevoeiro), uma neblina pesada e bastante poluída pelos gases supra indicados, também surgiram nesta altura. Após a Segunda Grande Guerra, a criação ou utilização de produtos sintéticos, tais como plástico e bifenilos policlorados (PCB - *PolyChlorinated Biphenyl*) alterou significativamente a caracterização da poluição, devido ao facto destes químicos não serem bio-degradáveis. Começaram a ser produzidos clorofluorcarbonetos (CFC's), utilizados para refrigeração e aerossóis. Sabe-se agora que este gás representa um grande perigo para a camada de ozono e por isso é atualmente proibido a sua utilização em vários países [45].

Assim, poluição do ar pode ser definida [46] por emissões de todas e quaisquer substâncias (gases, líquidos ou partículas sólidas) que não façam parte da atmosfera ou que, quando naturais, alteram significativamente as suas concentrações. Esta alteração diz-se significativa quando é produzido um qualquer efeito, a curto ou a longo prazo, mensurável em humanos, animais, vegetação ou materiais.

Estas emissões podem ter origem nos seguintes fatores [46]:

- antropogénicos - de origem humana, não natural. Exemplo: emissões de químicos não biodegradáveis;
- biogénicos - produzidos por organismos vivos ou processos biológicos. Exemplo: alteração de emissões VOC (*Volatil Organic Compunds* ou Compostos Organicos Voláteis) - pela plantação/destruição de florestas;
- geogénicos - processos geológicos (Ex.: alteração da concentração e constituição das poeiras por modificação humana significativa da crosta terrestre).

Os agentes poluentes podem ser classificados como primários, os que são diretamente emitidos para a atmosfera pela sua fonte, ou secundários, que se formam por reação química ou física dos agentes primários de poluição. Na primeira categoria fazem parte os compostos de carbono (CO , CO_2 , CH_4 e VOC's), nitrogénio (NO , NO_2 e NH_3), enxofre (H_2S e SO_2), halogéneo (cloretos, fluoretos e brometos) e ainda PM (*Particular Matter* ou partículas finas). Os PM podem estar num estado líquido ou sólido e a sua classificação é baseada no diâmetro das partículas. Os PM_{10} (entre 2,5 e 10 μm) são geralmente encontrados em indústrias poeirentas e $\text{PM}_{2,5}$ (menor que 2,5 e maior que 0,1 μm) têm origem em fogos florestais ou combustões industriais e são os que mais preocupação têm gerado devido ao perigo de inalação e consequentes problemas respiratórios [47]. A segunda categoria consiste nos compostos resultantes de um processo fotoquímico entre os poluentes primários e o meio ambiente. Os mais perigosos são NO_2 e HNO_3 , O_3 (vindo dos VOC's e NO), gotas de ácido sulfúrico e ácido nítrico (formados por SO_2 e NO_2 , respetivamente) e aerossóis, tanto orgânicos (formados por

VOC's em transformações de gás para partículas) como sulfatos e nitratos (originados pelas gotas ácidas já referidas com NH_3).

A preocupação com a qualidade do ar dentro de casa, também se evidencia importante [48], não só pela especificidade da sua origem antropogénica e por ser um ambiente fechado, mas também pelos efeitos a curto e longo prazo na qualidade de vida e saúde, especialmente de crianças, idosos e portadores de doenças cardiovasculares ou respiratórias [49]. Considerando que grande parte população passa 90% do dia no interior de um edifício [50] e há estudos que provam a possibilidade do ar estar mais poluído dentro de casa que no exterior, então o controlo e monitorização desta qualidade torna-se fulcral.

Num ambiente doméstico, as fontes de poluição são variadas e dependem de diferentes detalhes, específicos a cada situação. Os poluentes e as suas origens mais comuns são [51]:

- Rádon [52]¹ - Terra e pedras na fundação e à volta do edifício. Também pode estar presente em água, em menor quantidade;
- CO, CO₂, SO - todos os equipamentos de combustão, ou seja, lareiras, fogão, forno, grelhadores, tabaco, entre outros;
- PM's - lareiras e fornos a lenha, aquecimento a querosene (óleo de parafina) não ventilados, sabão em pó e sprays de limpeza, bolor, tabaco;
- ETS (*Environmental Tobacco Smoke* ou fumo de tabaco ambiente) - cigarros, cigarrilhas, cachimbo;
- Asbestos ² - tetos danificados, isolamento de tubagem, materiais acústicos, isolamento térmico, entre outros;
- VOC's - *sprays* com aerossóis, pesticidas, colas, tintas, bolas de naftalina;
- Formaldeído - carpetes, materiais de mobiliário, produtos de papel, colas, tabaco, produtos de madeira prensada;
- Chumbo - tinta à base de chumbo, zonas industriais de trabalho de chumbo, terrenos perto de auto-estradas, água que passa por canalizações de chumbo.

Para a deteção destas substâncias são necessárias ferramentas designadas para o efeito, que tanto podem ser específicas a uma, como indicadas para um grupo delas. As grandezas de medição mais comuns são ppm (partes por milhão, 10^6) e ppb (partes por milhares de milhão 10^9). São seguidamente apresentadas algumas destas ferramentas.

2.2.1 Equipamentos de medição profissionais

Apesar de existirem equipamentos de medição específicos, tanto para o exterior como interior de uma infraestrutura, para monitorização de poluentes, apenas recentemente começaram a surgir dispositivos portáteis, assim como soluções com integração na Internet das Coisas. Esta evolução permite uma utilização mais flexível dos equipamentos, tanto em ambientes industriais como domésticos, o que resulta numa vasta gama de produtos.

¹Gás radioativo sem odor, cor ou sabor resultante da decomposição natural de urânio ou rádio, é mensurável em pico Curie por litro;

²Fibra mineral natural presente em certos materiais de construção, comum em casas com mais de 20 anos.

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre diversos dispositivos dotados de uma grande variedade de sensores disponíveis no mercado. O Aeroqual 500 Series [53] é um dispositivo pequeno, orientado para medições profissionais na área de saúde e segurança, mais concretamente em estudos de exposição pessoal a poluentes e não é adequado para medições em ambientes industriais. O AQ-Pro [54] e o AQ-Expert [55] são dispositivos que usam os mesmos sensores, fabricados pela E-Instruments. O primeiro é um dispositivo móvel, pouco maior que um telemóvel e com capacidade até seis sensores, o segundo é um equipamento de tamanho semelhante a um osciloscópio de laboratório, que pode ser equipado com onze sensores.

Nenhum destes equipamentos apresentam serviços na *Cloud*, visto que a utilização destes sensores requer agentes profissionais para proceder a medições e avaliação do ar a monitorizar. Os serviços *online* que estas empresas fornecem só estão disponíveis para estações fixas que não foram aqui abordadas. Estas estações são equipamentos muito grandes, pesados e ainda mais dispendiosos que os equipamentos já descritos.

Gama Sensibilidade Precisão	Hand-held		Portátil		“Smart”	Micro I/O	Limites guiaão ^a (seguros ou confortáveis)
	Aeroqual 500 Series		AQ-PRO	AQ EXPERT	Alima / Foobot	Plataforma M-IO	
Temperatura [°C]			-40 a 125 0.1 +/-0.4		-40 a 125 — +/-0.4	-40 a 80 0.1 —	Verão: 22.8 a 26.1 Inverno: 20 a 23.6
Hum. Rel. [%]			5-95 0.1 +/-2		0-100 — +/-4	0-100 0.1 +/-5	30 a 65
Pressão [mbar]	—		260-1260 1 +/-2		—	—	—
VOC's [ppm]	0-25 0.1 +/-0.1	0-20 0.01 +/-0.2	0-20 1 +/-20	0-200 10 +/-50	Sim	Sim	N/A ^b
Formaldehyde CH ₂ O [ppb]	1-10 000 10 +/-50		0-10 000 10 +/-30		Sim ^c	—	30min @ 0.1 mg/m ³
O ₃ [ppm]	0-0.15 0.001 0.005	0-10 0.01 +/-0.01	0-5 1 —		—	10-1000 ppb <4 ppb	8h @ 0.0568 ppm
CO [ppm]	0-100 0.1 +/-1		0-200 0.1 +/-0.2		1-1 000 - -	0-1000 - +/-2%	15m @ 81.1 ppm 1h @ 28.4 ppm 8h @ 8.11 ppm
CO ₂ [ppm]	0-2 000 1 +/-10	0-5 000 1 +/-20	0-5 000 1 +/-10	0-20 % 0.1% +/-3%	400 - 600	0-10 000 - +/-30	8h @ 10000 ppm
H ₂ S [ppm]			0-100 1 +/-0.5		—	—	24h @ 100 ppm
NO [ppm]			0-250 0.1 +/-2		—	—	1 ano @ 22.7 ppb
NO ₂ [ppm]	—		0-20 0.1 +/-0.5		—	0.05-5 - -	1h @ 0.1 ppm 1 ano @ 15.9 ppb
SO ₂ [ppm]	0-10 0.01 +/-0.05		0-20 0.1 +/-0.5		—	—	10min @ 191.1 ppb 24h @ 47.8 ppb
NH ₃ [ppm]	0-1000 0.01 +/-5	0-100 0.1 +/-0.5	—		—	—	—
PM [mg/m ³]	—		—		PM2,5 0-20 0.1 +/-12%	0-0.5	PM10: 24h @ 50ug/m ³ PM2,5: 24h @ 25ug/m ³

^a [56, 57, 58];

^b Não existe limite estudado para a concentração deste grupo de substâncias, apenas para alguns dos seus constituintes, como por exemplo Formaldehyde;

^c No caso do Alima, é utilizado um sensor MOS com sensibilidade para medição de um grupo limitado de substâncias que pertence ao grupo de VOC's (Formaldehyde, Iso-Botano, Metano, Amoníaco entre eles). Utilizado apenas como indicador e não como uma medição concreta.

Tabela 2.1: Tabela comparativa de equipamentos de medição.

2.2.2 Equipamentos de medição não profissional

Seguidamente são apresentados equipamentos não profissionais mas que, de forma específica ou geral, têm como objetivo a medição de poluentes no ambiente doméstico para melhorar a qualidade de vida, conforto e segurança. Estes produtos também têm funcionalidades de interesse para este trabalho, especialmente no que toca à comunicação sem fios entre nós de sensores ou aos seus serviços na *Cloud* e inserção na IoT. Estes dispositivos, devido ao seu reduzido preço, são mais indicados para aplicação em habitações privadas, escolas ou escritórios.

Alima

Um dos dispositivos mais completos no mercado nesta área é o Alima da AirBoxLab, que oferece uma grande quantidade de sensores para a monitorização da qualidade do ar num ambiente doméstico, enunciados na Tabela 2.1.



Figura 2.6: Alima [59]

Conhecida agora, em 2015, como Foobot, a Alima lançou em 2014 um projeto de financiamento público para o lançamento em larga escala do seu produto [60].

Para se utilizar o Alima é apenas necessário ligá-lo e configurar a rede Wi-Fi. Monitoriza uma vasta gama de poluentes e um dos pontos mais fortes é o seu algoritmo preditivo. Esta funcionalidade analisa a vida quotidiana e eventualmente, é capaz de prever janelas temporais de risco e alertar o utilizador com dicas e conselhos. Estas sugestões são apresentadas pela aplicação móvel (disponível para Android e iOS), onde também é possível observar os dados recolhidos pelos sensores. Como complemento a esta funcionalidade, existe ainda a base de dados comunitária.

Nest Protect

Depois de lançar um termostato, a Nest decidiu construir também um alarme de fumo e CO, o Protect.

Os sensores principais são o fotoelétrico para o fumo e o eletroquímico para o monóxido de carbono, além disso este dispositivo vem também munido de mais seis sensores. [62].



Figura 2.7: Nest Protect [61]

Um sensor de calor faz a detecção de aumentos bruscos de temperatura, dois sensores de ultras- sons e um de proximidade detetam presença e movimento no eixo vertical, nas proximidades do dispositivo. Estes três sensores são utiliza- dos na funcionalidade “*Pathlight*”, que em con- junto com um sensor de luminosidade, acende automaticamente uma luz guia (LED de baixa intensidade), durante 5 segundos, à noite. Este sensor de luminosidade tem também uma se- gunda função: sempre que há uma variação brusca de alta para baixa intensidade de luz (por exemplo, a iluminação da divisão é desli- gada), é ativado a “*Nightly Promise*”, que é uma luz interna do Protect que faz com que este brilhe. Se este brilho for verde, significa que o aparelho está operacional e tem bastante carga na bateria. Se o brilho for amarelo, é porque algo de errado foi detetado, como por exemplo bateria fraca ou houve algum problema com os sensores. Se o utilizador tiver também o Nest Learning Thermostat, a funcionalidade *Auto-Away* vai ser melhorada, pois os dois dispositivos, caso associados na mesma conta, comunicam entre si a ocupação humana da casa.

O Protect tem também altifalantes de 80db (a 1 metro a 1kHz) e uma sirene de 85dB (a 3 metros). Este aparelho utiliza o protocolo Wi-Fi 802.11 para ligação à Internet e 802.15.4 para comunicação entre todos os produtos de marca Nest [63], mesmo que haja falhas de energia ou de conexão do primeiro protocolo. Utiliza ainda Bluetooth Low Energy (BLE) para situações específicas, tais como instalação do dispositivo, verificações de segurança e rearme de alarmes sonoros. Tem compatibilidade com iOS 8 e também com Android 4, ou mais recente. Este dispositivo, relativamente a alimentação elétrica, tem duas versões diferentes, um que se alimenta através da rede elétrica existente e a outra por 6 pilhas AA.

Ao atribuir nomes a diferentes alarmes (por exemplo, a divisão da casa onde estão insta- lados), quando um é acionado, os outros também ligam a sirene e uma voz indica qual divisão está em perigo. Igualmente, quando um alarme é desativado (acenando durante alguns segun- dos uma mão perto do aparelho) por ser falso, os outros também se silenciam.

Relativamente a serviços *online*, o Nest Protect disponibiliza toda a informação para que seja possível monitorizar o estado do dispositivo em qualquer lugar, incluindo um historial de 10 dias. O dispositivo pode também ser configurado para enviar mensagens de rede GSM (*Global System for Mobile Communications*) quando algum evento é acionado.

Roost

Com uma campanha de “*crowdfunding*” bem sucedida em 2014, a equipa da Roost pro- mete desenvolver uma bateria de lítio do tama- nho de uma pilha de 9V, que comunica atra- vés da rede Wi-Fi doméstica de pouca potên- cia. Esta pilha tem a capacidade de detetar o acionamento de um alarme de fumo e/ou CO e, através de uma aplicação móvel, notificar o utilizador. A equipa aponta para uma autono- mia superior a 5 anos e outra funcionalidade



Figura 2.8: Roost Smart Battery [64]

da aplicação móvel é o aviso de bateria fraca.

A aplicação móvel deste dispositivo é simples e direta. Quando o alarme de um detetor é ativado, a aplicação é notificada e o utilizador pode fazer rapidamente uma chamada de emergência, ou uma chamada para outra entidade, dependendo de como configurou a aplicação. É possível identificar os detetores com um nome, através da configuração do aparelho [65].

A pilha Roost apenas poderá ser utilizada, pelas suas características, em alarmes alimentados a bateria. Iniciaram a entrega do produto para os apoiantes do financiamento colaborativo em Junho de 2015.

Wally Home

O dispositivo que mais se destaca no mercado de deteção de fugas de água é o Wally Home, da SNUPI Technologies.



Figura 2.9: Wally [66]

Disponível desde inícios de 2014, este produto é constituído por um *hub* e diversos nós de sensores. Cada nó é capaz de detetar fugas de água e condições de risco a nível de humidade e temperatura. Tal como todos os produtos não profissionais até aqui apresentados, também o WallyHome é conectado à Internet e dispõe de uma aplicação móvel para monitorização e notificações. No entanto, o que torna este dispositivo realmente interessante é a sua tecnologia para comunicação [67]: SNUPI - *Sensor Network Utilizing Powerline Infrastructure*, como o próprio nome indica, usa a rede elétrica já existente numa casa como antena recetora do *hub*. Assim, cada nó necessita apenas de uma antena transmissora de muito baixa potência porque a distância de transmissão sem fios não necessita de ser muito grande: os fios de cobre da rede elétrica estão presentes em praticamente todas as divisões de uma casa. Isto tem como efeito uma maior área de cobertura deste sistema: no teste realizado no artigo técnico da SNUPI, a cobertura de comunicação sem fios desta tecnologia alcançava valores na ordem dos 90% da área de uma casa, enquanto que outras tecnologias ficavam nos 75 %.

O consumo de um nó de sensores com outras tecnologias provém maioritariamente da utilização da antena para transmissão de dados e está na ordem das dezenas de mW no total. Com a tecnologia SNUPI, a vida da bateria é prolongada pois o nó tem um consumo de apenas 1 mW quando ativo, dos quais 65 uW são para a transmissão de dados. Isto significa que um nó com um sensor de luz tem energia suficiente para, segundo o artigo, pelo menos 10 anos quando utilizada uma bateria de 225 mAh e com uma transmissão por minuto.

2.2.3 Observações finais

Neste subcapítulo foram apresentados diversos sensores e produtos relacionados com a medição de qualidade do ar, tanto profissionais como não profissionais.

No primeiro caso, existe a necessidade destes sensores seguirem regras extremamente rigorosas relativamente às suas características, tais como precisão, exatidão e sensibilidade. Desta forma, a qualidade dos dados obtidos é conhecida e decisões de grande porte (tanto a nível económico como de saúde) podem ser tomadas em função dos seus resultados. Por esta razão, existe a tendência destes sensores serem especializados e dispendiosos, sendo apenas utilizados por algumas organizações ou indústrias [68].

Por outro lado, desenvolvimentos de tecnologia recentes permitiram a difusão de sensores de muito baixo custo que, embora não tenham as mesmas características que um sensor profissional, podem ser utilizados para medições qualitativas em larga escala. A investigação científica atual nesta área é bastante difundida, com realce acentuado no estudo e desenvolvimento destes sensores de baixo custo. A EPA (*Environmental Protection Agency*) nos EUA e EUNETAIR [69] na Europa são apenas dois exemplos de organizações de importância nesta área.

Neste subcapítulo foram também dados exemplos de dispositivos que interligam os três grandes temas deste trabalho, domótica, Internet das Coisas e a qualidade do ar.

2.3 Tecnologias de comunicação para interface entre sensores

Atualmente, não existe qualquer padronização “universal” para a tecnologia de comunicação na IoT. Ou melhor, existem demasiados padrões em confronto direto entre si, com vista à soberania no mercado [70]. A Figura 2.10 ilustra a grande variedade de protocolos existente nas diferentes camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*).

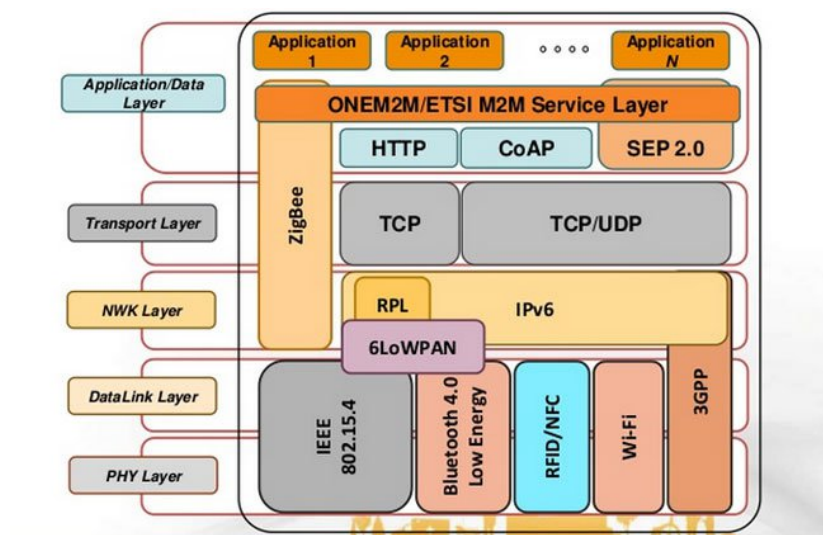


Figura 2.10: Modelo OSI da IoT (retirado de [72])

Vários fatores contribuem para esta fragmentação, sendo talvez o mais importante o grande leque de especificações que diferentes aplicações acarretam. Por exemplo, as necessidades para

transmissão de vídeo em alta definição são completamente distintas das características necessárias para uma rede de sensores. No primeiro caso, o ritmo de transmissão é imperativamente alto devido à grande quantidade de informação que tem que ser transmitida e, no caso de vídeo-conferência ou *streaming*, a latência e *jitter* devem ser minimizadas [73]. No segundo caso, uma rede de sensores implica normalmente transmissões esporádicas e uma forte limitação de recursos, especialmente a nível energético e capacidade de processamento, pelo que a tecnologia de comunicação deve adaptar-se a estas características [74].

No âmbito deste trabalho distingue-se a necessidade da utilização de um protocolo para a criação e gestão de uma rede pessoal ou local para comunicação com plataformas de sensores. Este protocolo de interface de rede enquadra-se nas camadas física e ligação de dados. A camada física define as características de transmissão e receção de bits não-estruturados para o meio físico de comunicação e transmite estes sinais para as camadas superiores. A camada de ligação de dados é responsável pela transferência, sem erros, de tramas de dados de um ponto para outro. Esta camada é dividida em duas sub-camadas. A primeira, o MAC (*Medium Access Control*), é responsável pelo enquadramento de pacotes e dita as regras de acesso ao meio de transmissão com o objetivo de minimizar colisões. A segunda sub-camada é o LLC (*Logical Link Control*), responsável pela interface entre a camada superior e a sub-camada MAC através da multiplexação e demultiplexação de mensagens e oferece serviços de controlo de fluxo da comunicação [75].

Para este trabalho foram consideradas três tecnologias, que seguidamente são apresentadas. No subcapítulo 5.1, são comparados vários transdutores disponíveis para estas tecnologias e é escolhida uma delas, sendo esta escolha devidamente justificada.

2.3.1 Bluetooth Low Energy

Criado em 2010 como parte da especificação Bluetooth v4.0, este protocolo é conhecido como BLE ou Bluetooth Smart. Esta tecnologia tem como objetivos principais a transferência de mensagens sem fios entre módulos com o mínimo de energia despendida possível, baixo custo e fácil implementação. Opera na gama de frequências não-licenciadas da banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), o BLE usa esta banda dividida em 40 canais com uma separação de 2 MHz.

O BLE tem as seguintes características principais [76, 77]:

- Otimização para topologia ponto-a-ponto em modo *master-slave*. A topologia em estrela também é suportada;
- Endereços de 32 bits;
- Mecanismo de saltos de frequência para minimizar interferência;
- 24 bits de CRC (*Cyclic Redundancy Check*), encriptação AES (*Advanced Encryption Standard*) de 128 bits;
- Latência mínima de 3 ms para estabelecimento de ligação;
- Tamanho de tramas entre 8 e 27 octetos;
- Transferência de dados máxima de 236.7 kbps [78].

2.3.2 MiWi

Este protocolo é propriedade da Microchip Technology criado especificamente para LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*) ou seja, uma rede de curto alcance (pessoal) para comunicação sem fios de baixo ritmo, consumo e custo [79, 80, 81]. Este protocolo tem por base as camadas física e ligações de dados do standard IEEE 802.15.4 e providencia mecanismos para um dispositivo encontrar, formar e entrar numa rede. Não define, no entanto, serviços específicos à possível aplicação, tais como processos de escolha da rede em que o dispositivo entra, frequência de comunicação entre dispositivos ou decisão de ligação perdida.

Há três tipos diferentes de dispositivos numa rede MiWi: um PAN Coordinator que gere a rede, Coordinators ou Routers que gerem a sua sub-rede e End-Devices. Os dois primeiros tipos têm obrigatoriamente de ser *Full Function Device* (FFD), ou seja, têm que ter todos os serviços e definições do protocolo, enquanto que os End-Devices podem optar por ser *Reduced Function Device* (RFD), com um número limitado de serviços.

O MiWi tem as seguintes características principais:

- Topologias estrela, ponto-a-ponto, árvore e malha suportadas;
- Banda de frequência: 868 MHz (1 canal), 915 (10 canais) MHz e 2.4GHz (16 canais);
- Máximo de 1024 nós por rede - 8 coordenadores, cada um com 127 conexões. Limite de 1 PAN Coordinator;
- Endereçamento global de 8 bytes (EUI - *Extended Organizationally Unique Identifier*);
- Endereçamento do dispositivo de 16 bits;
- Identificação de uma rede (ou sub-rede) com um PANID de 16 bits;
- Suporte à utilização de *beacons*;
- Suporte de ACK - *Acknowledge*, aviso de receção de mensagem;
- Mensagens com um máximo de 4 *hops* na rede e 2 *hops* com origem no PAN Coordinator;
- 127 octetos máximos numa mensagem (99 de *Payload*);
- 16 bits de CRC;
- Transferência de dados e eficiência da largura de banda (em percentagem) [81]:
 - 868 MHz: 16 kbps, 83.1%;
 - 915 MHz: 33 kbps, 83.1%;
 - 2.4 GHz: 162 kbps, 64.9%.

2.3.3 Wi-Fi

Baseado no standard IEEE 802.11, o Wi-Fi é uma tecnologia de transmissão e recepção de dados sem fios. Ao longo dos anos têm surgido diferentes variantes do mesmo standard, sendo a variante 802.11g a mais comum e aqui apresentada.

Aprovada a Junho de 2003 , a variante Wi-Fi tem as seguintes características principais [82, 83]:

- Banda de frequência de 2.4 GHz;
- Taxa de bits máxima de 54 Mbps na camada física, transferência de dados máxima de 24.7 Mbps;
- Topologia ponto-a-ponto (*ad-hoc*) e estrela (infraestrutura) suportadas;
- Vários mecanismos de encriptação e autenticação;

Capítulo 3

Princípios Tecnológicos de Sensores

Um transdutor, como equipamento de medição, “faz corresponder a uma grandeza de entrada uma grandeza de saída segundo uma lei determinada” [88]. Assim, o propósito de um sensor, como transdutor de entrada com saída de natureza elétrica, é a transformação de um estímulo de entrada (mecânica, térmica, magnética, elétrica, química ou radioativa) em sinais elétricos analógicos que posteriormente são usados por uma unidade de processamento [89]. Normalmente, isto implica filtragens, amplificações, modelagem, digitalizações, entre outros acondicionamentos de sinal, antes de serem verdadeiramente utilizados pelo equipamento como medida da grandeza inicial.

3.1 Sensores de Temperatura

Embora seja um conceito macroscópico, a temperatura depende de variáveis microscópicas: a energia cinética média de todas as partículas de um corpo definem a sua temperatura [90]. Existem duas formas de transferência de energia cinética entre as partículas de dois corpos. A primeira é pela transferência de agitação das partículas do primeiro corpo para o segundo através de contacto físico e a segunda pela troca de radiação eletromagnética (infravermelhos) entre as partículas dos dois corpos.

Os sensores de temperatura são dispositivos sensíveis à energia cinética média das partículas de um corpo, ou à sua radiação, e são capazes de a transformar em sinal elétrico. Desta natureza surge dois tipos distintos de sensores: um que exige contacto com o corpo a medir; outro que mede comprimentos de onda do espectro infravermelho emitidos pelo corpo, não necessitando assim de contacto físico para a medição. Este último tipo de sensor não será abordado neste sub-capítulo, pois não é eficaz na medição da temperatura de gases. Este facto limita fortemente a sua aplicação na medição de temperatura num ambiente doméstico, sendo mais utilizado para deteção de presença e movimento de seres vivos.

Os sensores de contacto podem ser divididos em quatro classes pela sua tecnologia, que são eletromecânicos, eletrónicos, resistivos e de circuito integrado, seguidamente apresentados.

3.1.1 Termopar

Os termopares utilizam um princípio conhecido como o efeito de Seebeck: quando dois condutores elétricos de diferentes metais são unidos em ambas as extremidades é criada uma corrente contínua no circuito, proporcional à diferença de temperatura entre as duas extremi-

dades. Isto deve-se ao facto que na extremidade mais quente, os eletrões contêm mais energia cinética do que na outra extremidade, o que provoca o movimento destes eletrões na direção da extremidade mais fria. É possível obter uma diferença de potencial entre os dois condutores com apenas uma extremidade unida.

Os termopares são diferenciados, relativamente às gamas de temperatura e forma de aplicação, pelos metais utilizados na junção. Os tipos J, K e T são os mais comuns e são construídos com metais como ferro, cobre, constantan, chromel e alumel [91]. O tipo T é, no âmbito deste trabalho, o mais interessante. Feito de cobre e constantan, este termopar tem uma gama de medição entre os 250 negativos e 350°C e exatidão standard de 1°C, comportando-se bem em ambientes muito húmidos pela sua resistência à oxidação [92]. É comum a junção ser protegida da atmosfera por uma vareta metálica. No entanto, devido à necessidade de compensação de junção fria, estes sensores apenas têm as suas vantagens aproveitadas ao máximo quando a diferença de temperaturas entre a junção fria e a quente (de medição) é considerável. Este facto limita a sua aplicação num ambiente doméstico. A figura 3.1 mostra um sensor desta classe sem proteção, do tipo K ou T.

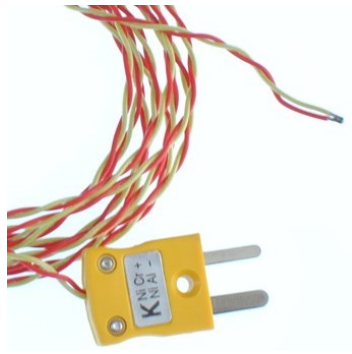


Figura 3.1: Termopar K ou T (Retirado de [93])

3.1.2 Termístor

Os termístores utilizam resistências sensíveis à variação da temperatura. Estas resistências são compostas, normalmente, por dois ou três semicondutores sinterizados ¹ numa base cerâmica. Existem termístores com coeficientes positivos PTC (*Positive Temperature Coefficient*) ou negativos NTC (*Negative Temperature Coefficient*). O NTC é o mais utilizado, pois quando comparado com termístores PTC, os primeiros oferecem uma maior variação na resistência - o que significa uma maior sensibilidade às mudanças de temperatura - e também por estarem disponíveis em dispositivos extremamente pequenos, com uma resposta térmica bastante rápida. Apesar de ter uma grande sensibilidade, o termístor é o tipo de sensor que apresenta a maior não-linearidade dos que aqui são apresentados.

A função $R = R_0 e^{\beta(1/T - 1/T_0)}$ relaciona o par resistência R [Ω] e temperatura T [K] com o par conhecido resistência R_0 e temperatura T_0 , típico neste tipo de sensores. A constante β [K] representa a característica do termístor que está relacionada com o par resistência-temperatura

¹

Sinterização: operação que consiste na aglomeração e compactação de pós ou partículas muito pequenas, a altas temperaturas, mas abaixo da temperatura de fusão, para obter blocos ou peças sólidas.

conhecido e é utilizada para calcular a resistência do sensor dentro de uma gama apropriada [94, 95].

Um ponto negativo neste tipo de sensor é a sua possível descalibração devido a medições de temperatura no limite da sua gama de medição.

A figura 3.2 mostra um termístor da AVX, modelo ND03P00223K e a tabela 3.1 apresenta as suas principais características.



Temp. Mín.	-55°C
Temp. Máx.	150°C
Resistência	330Ω a 1MΩ
Tolerância (a 25°C)	± 5, 10, 20%
Tempo de resp. (63%)	<3 s
Dissipação Térmica	5 mW/°C

Figura 3.2: Termístor NTC (Retirado de [96])

Tabela 3.1: Características (Adaptado de [96])

3.1.3 RTD

Os sensores RTD (*Resistive Temperature Devices*) [97], como os termístores, têm também como princípio de funcionamento resistências sensíveis à variação de temperatura. São um tipo de sensor com coeficiente de temperatura positivo e apresenta uma resposta linear em função da temperatura.

Existem dois processos de fabrico possíveis: o método de “*wire-wound*” e o de elemento de película fina. No primeiro, um fio fino é tornado numa bobina e protegido contra choques e vibrações através de um revestimento de cerâmica. O segundo, que é o processo mais recente e barato, consiste no depósito de uma película fina do material base num substrato de cerâmica e depois aparado até se obter a resistência desejada. Normalmente, o material base utilizado é a platina, pois é o que oferece a melhor linearidade quando comparado com outros metais.

A equação $R \approx R_0(1 + a_1T)$ demonstra como um metal varia a sua resistência consoante a temperatura, onde R é a resistência do sensor à temperatura T , R_0 a resistência do sensor a 0°C (valores típicos para platina são 100 e 1000Ω respetivamente) e a_1 uma constante [94].

A figura 3.3 apresenta um exemplo comercial de uma RTD de película fina, de platina, e a tabela 3.2 as suas principais características.



Temp. Mín.:	-200°C
Temp. Máx.:	300°C
Resistência nominal:	100Ω a 0°C
Tempo de resp. (63% no ar)	4.9 s
Auto-aquecimento (no ar)	3.2 mW/K

Figura 3.3: P0K1 (Retirado de [98])

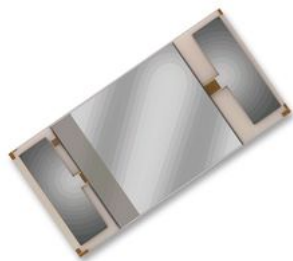
Tabela 3.2: Características (Adaptado de [98])

3.2.1 Sensores Capacitivos

A permitividade elétrica de um sistema varia com a quantidade de água nele presente. Um sensor capacitivo é capaz de medir humidade relativa através da variação da sua capacidade, onde o dielétrico é um substrato de polímero ou óxido de metal, que varia grandemente a sua permitividade e consequentemente a sua constante dielétrica na presença de água. Esta solução tem a grande vantagem de obter uma função transferência praticamente linear, para além de apresentar um coeficiente de temperatura muito baixo, o que significa que pode funcionar a temperaturas altas, na ordem dos 200°C, sem necessitar de compensação de temperatura ativa [102].

A nível comercial, existem sensores capacitivos cuja precisão varia entre 1.5 e 5%, sensibilidade entre +/-1 e +/-5% e tempo de resposta entre 5 milissegundos e 3 minutos. A gama de leitura é de 0 a 100% e existe uma grande oferta de sensores com diferentes valores de capacidade, temperatura de operação e necessidades de alimentação.

A figura 3.5 ilustra o modelo P14 FemtoCap-G e a tabela 3.3 as suas principais características.



Gama de Hum. (Rel.)	0 a 100%
Sensibilidade	±1.5%
Cap. Base	180pF ±50pF
	@ 23°C, 30% RH
Temp. Fun.	[-50, +150]°C
Tempo de Resp.	3s
Auto-aquecim. (ar estagnado)	0.1°C

Figura 3.5: P14 FemtoCap (Retirado de [103])

Tabela 3.4: Características (Adaptado de [103])

3.2.2 Sensores Resistivos

Outra forma de medir a humidade relativa é através da variação da impedância de um condutor, que se relaciona inversa e exponencialmente com a humidade.

Estes sensores são compostos por elétrodos de metais nobres que são ou depositados num substrato condutor (como polímero ou sal) ou enrolados como fios à volta de um cilindro de vidro ou plástico. Um aumento na impedância do sensor acontece quando grupos iónicos são dissociados devido à absorção de vapor de água. O tempo de resposta a 63% de um sensor resistivo está na ordem dos 10 a 30 segundos e tem uma gama de impedância típica entre os 1k Ω e 100 M Ω [102].

A figura 3.6 ilustra o modelo HCZ-D5 da Multicomp e a tabela 3.5 as suas principais características.



Figura 3.6: HCZ-D5-A (Retirado de [104])

Gama de Hum. (Rel.)	0 a 90%
Sensibilidade	$\pm 2\%$
Game de Resistência	19.8 a 50.2k Ω
Temp. Func.	0 a 60°C
Auto-aquecim.(ar estagnado)	0.1°C

Tabela 3.5: Características (Adaptado de [105])

3.3 Sensores de Luminosidade

Um feixe de fótons a viajar à velocidade de sensivelmente 3×10^8 m/s criam o que se designa por onda eletromagnética, pois perpendicularmente à sua direção é gerado um campo elétrico e um campo magnético, perpendiculares entre si. Estas partículas têm como propriedades: frequência, comprimento de onda, velocidade, momento linear e energia. Quanto maior for a energia de um fóton, maior é a sua frequência e mais pequeno é o seu comprimento de onda [106], como pode ser observado no espectro eletromagnético, na figura 3.7. A radiometria tem como objetivo a medição de todo espectro eletromagnético, mais focada na radiação ultra-violeta, luz visível e infravermelhos [107].

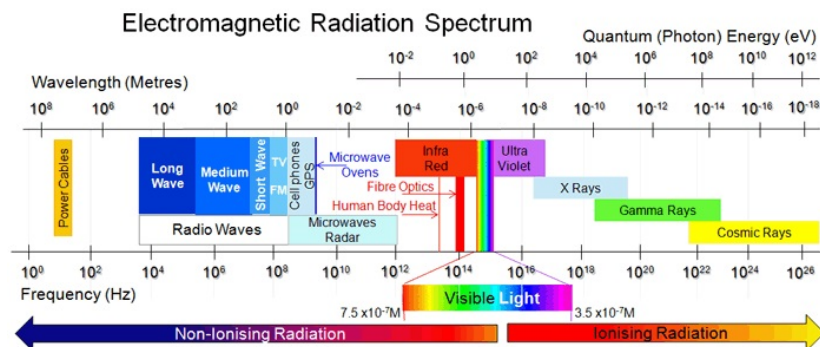


Figura 3.7: Espectro da Radiação Eletromagnética (Retirado de [108])

A luz visível é portanto, um feixe de fótons com comprimentos de onda compreendidos entre 780 nm (cor vermelha, fótons com menos energia, transportam mais calor) e os 380 nm (cor violeta) [109]. O olho humano responde a esta radiação com a designada resposta fotópica, como ilustrado na figura 3.8 Desta forma, o olho humano não é capaz de destingir a energia emitida por unidade de tempo [110]. Por exemplo, uma luz vermelha é percecionada como mais brilhante que uma luz azul quando as duas radiações têm a mesma intensidade. A sensibilidade do olho é máxima para radiações com comprimento de onda nos 555nm, que corresponde à cor verde.

Torna-se então evidente a necessidade de utilizar unidades específicas para analisar a luz no espectro visível quando a sensibilidade do olho humano está em causa. A fotometria é a adaptação à resposta fotópica das grandezas da radiometria. A tabela seguinte relaciona as unidades radiométricas com as fotométricas.

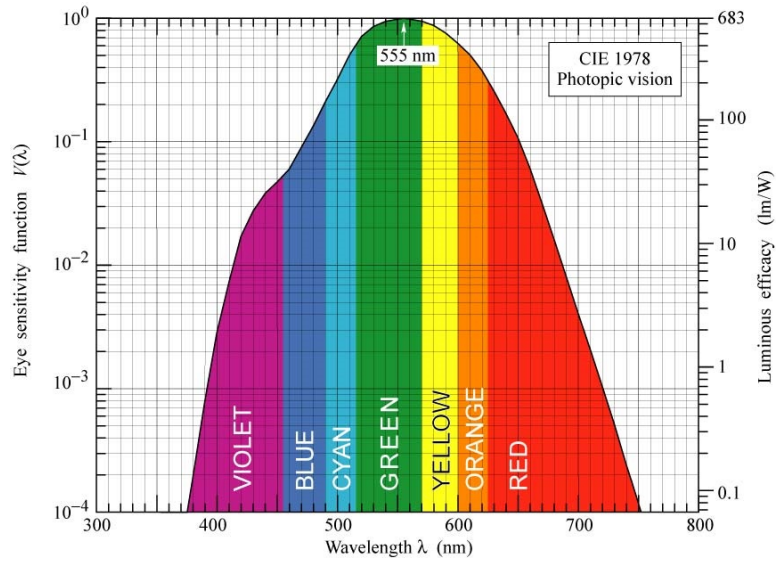


Figura 3.8: Resposta fotópica do olho humano (Retirado de [111])

	Radiometria	Fotometria
Energia	Energia Radiante (Joules [J])	Energia Luminosa (Lumen por segundo [lm.s])
Potência	Fluxo Radiante (Watts [W])	Fluxo Luminoso (Lumen [lm])
Potência por área	Irradiância (W/m²)	Lux (lux ou lm/m²)

Tabela 3.6: Unidades: Radiometria vs Fotometria (Adaptado de [109])

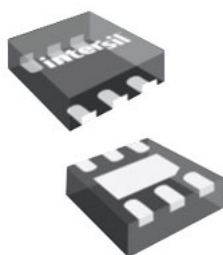
A transformação das grandezas radiométricas em fotométricas é através da aplicação da resposta fotópica como filtro: $[\text{grandeza fotométrica}] = [\text{grandeza radiométrica}] \times 683 \times V(\lambda)$, onde 683 é o número de Lumen equivalente à radiação de uma fonte de luz com 1W de potência com comprimento de onda de 555 nm e $V(\lambda)$ é a resposta fotópica normalizada [107].

Nesta dissertação, só vai ser abordada a medição do espectro eletromagnético na faixa da luz visível com sensores quânticos.

3.3.1 Foto-díodo

O foto-díodo é um transdutor que utiliza um semicondutor para medir radiação luminosa: numa junção PN inversamente polarizada, um fóton incidente pode ter energia suficiente para excitar e libertar um elétron de um átomo, criando um par elétron-buraco livre. A chamada foto-corrente acontece quando a resistência do díodo diminui devido à separação destes pares por ação do campo elétrico da polarização inversa. Em ambientes de escuridão, a corrente gerada é independente da diferença de tensão aplicada e é apenas atribuída a ruído térmico.

A figura 3.9 apresenta um foto-díodo num circuito integrado, o ISL29035, preparado para comunicação I²C com saída digital. A tabela 3.7 indica as principais características do produto.



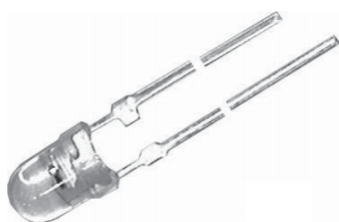
Resolução	16 bits
Fonte de corrente	57 μ A
Fonte de tensão	2.25 a 3.63V
Temp. de operação	-40 a 85°C
Tempo de leitura	< 90 ms
Leitura mín.	0 Lux
Leitura máx.	64 kLux

Figura 3.9: Foto-díodo ISL (Retirado de [112])

Tabela 3.7: Características (Adaptado de [113])

3.3.2 Foto-transistor

Um foto-transistor converte a energia dos fótons em corrente elétrica da mesma forma que os foto-díodos, com a vantagem de conseguir introduzir ganho na corrente, o que resulta numa maior sensibilidade. A geração dos pares eletrão-buraco acontece na região coletor-base pelo que estes transístores têm esta área maior quando comparado com um transistor comum, de modo a receber mais luz.



Corrente mín.	10 μ A
Corrente máx.	2 mA
Corrente escura (típica)	3 nA
Ângulo de meia-sensibilidade	30°
Leitura mín.	10 Lux
Leitura máx.	1000 Lux

Figura 3.10: Fototransistor Vishay TEPT4400 (Retirado de [114])

Tabela 3.8: Características [114]

3.3.3 Foto-resistência

Também conhecidos por LDR (*Light Dependent Resistors*), as foto-resistências apresentam uma resistência alta na ausência de luz, na ordem dos $M\Omega$, e na presença de luz na ordem das unidades de Ω .

O processo físico utilizado nos LDR's é semelhante aos outros sensores óticos. No entanto, estes podem ser divididos em duas categorias com base no material usado na sua construção, os intrínsecos e os extrínsecos [115]. Na primeira categoria, são usados metais não dopados como silício e germânio. Na segunda categoria, são usados metais dopados. A diferença entre as duas categorias estabelece-se no facto de, com materiais dopados, a energia necessária para a formação de pares eletrões-buracos livres é menor quando comparado com metais puros, pois a introdução de impurezas contribuem para o aumento de buracos (tipo p) ou aumento da população de eletrões (tipo n) [116].



Potência dissipada	80 mW
Resistência @ 10 lux (típico)	24 k Ω
Resistência @ 0 lux (típico)	500 k Ω
Tempo de Resposta (Subida)	78 ms
Tempo de Resposta (Descida)	8 ms

Figura 3.11: VT90N2 LDR (Retirado de [117])

Tabela 3.9: Características [117]

3.4 Sensores de Concentração de Gases

Os sensores de gases são utilizados para a detecção e medição de substâncias químicas no estado gasoso, específicas ou gerais, no ar. É importante na detecção de gases inflamáveis, combustíveis ou tóxicos e também na determinação da concentração de oxigênio [118].

A medição de substâncias químicas provoca duas dificuldades específicas na construção de sensores [119]. As técnicas utilizadas pela grande parte dos sensores para a medição destas substâncias tem por base reações químicas, o que implica que o próprio processo de medição modifica o sensor, em alguns casos de forma irreversível. A segunda dificuldade diz respeito à seletividade da substância alvo: este tipo de sensores são expostos a meios onde existe um número indeterminado de químicos misturados, o que leva a uma grande preocupação em termos de interferências na medição e até contaminação do sensor que resulta na sua descalibração.

Seguidamente são apresentados exemplos de sensores de baixo custo.

3.4.1 Sensor eletroquímico

Os sensores eletroquímicos podem utilizar métodos que consistem na medição de voltagem, corrente, condutividade ou resistividade em processos de oxidação ou redução de substâncias químicas específicas [120]. Em todos estes métodos é necessário uma malha fechada para que uma corrente elétrica, tanto AC como DC (*Direct Current*), possa existir. Como tal, é obrigatório o uso de pelo menos dois eletrodos, o de trabalho e o de retorno, envoltos num líquido eletrolítico. Estes eletrodos são normalmente desenhados para ter uma grande superfície de forma a maximizar a reação com o líquido eletrolítico em que estão mergulhados e por consequência, obter o maior sinal de medição possível. O eletrodo de trabalho é onde a reação química desejada acontece e a medição do analito é em função de um terceiro eletrodo de referência. Em alguns casos, existe um eletrodo adicional de referência para corrigir erros introduzidos pela polarização do eletrodo de trabalho.

3.4.2 Sensor de metal oxidado

Também conhecido por MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) este sensor é constituído por um semiconductor (tipicamente de dióxido de estanho, SnO₂) que, quando aquecido a uma temperatura definida, forma um potencial na superfície em contacto com o ar através da absorção de oxigênio nessa superfície, o que resulta numa inibição de movimentação dos eletrões.

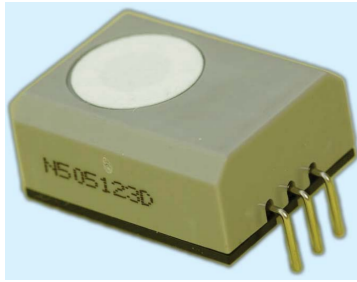


Figura 3.12: Nemoto NAP505
(Retirado de [121])

Substância alvo	CO (Monóxido de Carbono)
Gama de leitura	0 - 1000 ppm
Sensib.	40 nA \pm 10 nA/ppm
Tempo de resposta	<30 s
Longevidade	7 anos (esperado)

Tabela 3.10: Características [121]

Na presença de gases redutores, o potencial na superfície diminui e a condutividade do metal aumenta significativamente. Este comportamento resulta na variação da resistência do metal em função da concentração do analito [122].

Como tal, para a medição desta variação é necessário eletrônica adicional para a medir. É comum a utilização de uma ponte de Wheatstone, onde é necessário em paralelo um termistor com coeficiente negativo, NTC, com uma resistência linearizante, de modo a equilibrar a ponte conforme a temperatura do sensor [123].

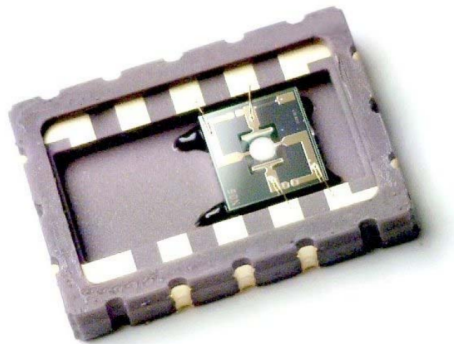


Figura 3.13: e2V MiCS-2614 [124]

Substância alvo	O ₃ (Ozono)
Gama de leitura	10 - 1000 ppb
Pot. de aquec.	66 - 95 (typ: 80) mW
Factor Sens. Máx	4

Tabela 3.11: Características [124]

3.4.3 Sensor biomimético

Um sensor biomimético foi um tipo de sensor bastante utilizado até ao final da década de 90 para em alarmes de CO. Este sensor simula a reação que a hemoglobina de um organismo biológico tem sob a presença de CO [125]. Esta simulação tem por base a utilização de um gel (hemoglobina sintética) que, na presença de CO, muda de cor (escurece) devido à perda de átomos de oxigénio do gel (oxidação do monóxido de carbono, que resulta em dióxido de carbono). A cor do gel volta ao normal caso a presença da substância química é retirada devido à absorção de átomos de oxigénio do ar [126]. Através da emissão de infravermelhos, a alteração de cor pode ser detetada.

Devido a este método ser pouco robusto e necessitar de um longo tempo de recuperação, assim como o avanço tecnológico ter permitido o desenvolvimento de outros métodos de medição, este tipo de sensores deixou de ser vendido [127].

A Figura 3.14 ilustra um cartão com o material sintético.

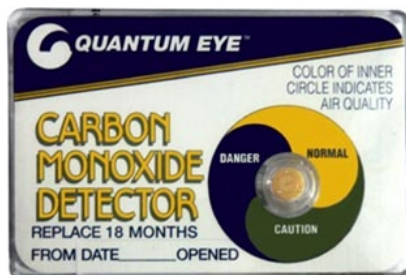


Figura 3.14: Quantum Eye CO Detector. (Retirado de [128])

3.5 Sensores de Partículas

A necessidade de monitorizar as partículas presentes no ar que respiramos é recente. No entanto, detetores de fumo não o são devido ao fato da deteção de incêndios ser mais óbvia e imediata. Para a deteção de incêndios são usados diferentes princípios, sendo o mais usual o “onde há fumo, há fogo”, o que acaba por nos levar à medição de partículas, uma vez que fumo são gases e partículas de tamanho variável. Por exemplo, num incêndio violento, as partículas emitidas podem ter um tamanho compreendido entre 24 e 0.042 micro-metros, com particular concentração aos 4.2 e 1.34 micro-metros [129].

Existem duas tecnologias bastante usadas para a deteção de fumo em ambientes domésticos [130]: sensores fotoelétricos e sensores de ionização, seguidamente apresentadas.

3.5.1 Sensor de ionização

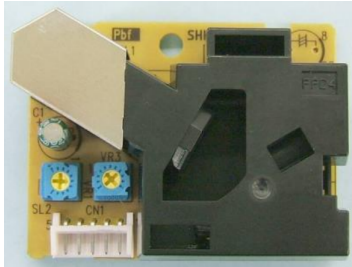
A deteção de fumo por ionização [131] material radioativo Americium-241, que gera uma radiação alfa muito baixa. O ar ionizado pela radiação permite que uma pequena corrente se estabeleça entre dois elétrodos. Quando as partículas de fumo entrarem na câmara de ionização os iões livres são neutralizados, a corrente entre os dois elétrodos é interrompida e o alarme é ativado.

A utilização de material radioativo neste processo é completamente segura, pois a radiação emitida é tão fraca que não consegue penetrar uma folha de papel. No entanto, a utilização de material radioativo dificulta a reciclagem destes sensores, assim como aumenta o custo da sua produção. Adicionalmente, avanços tecnológicos tornam o desempenho de outros sensores equiparável ou melhor. Por estas razões, a System Sensor, uma empresa fabricante de vários dispositivos relacionados com incêndios e segurança de vida, decidiu terminar a produção de alarmes de incêndio que usam esta tecnologia em Junho de 2015 [132].

3.5.2 Sensor fotoelétrico

O sensor fotoelétrico [133] utiliza um emissor/recetor ótico dentro de uma câmara escura. Em condições de ausência de fumo, nenhuma luz é recebida no sensor ótico devido à existência de um ângulo de incidência entre este e o emissor. No entanto, com partículas visíveis de fumo dentro da câmara, a luz é refletida para todas as direções, e o alarme é acionado quando o recetor é influenciado pela luz. O inverso do modo de deteção também pode acontecer: quando

o emissor e recetor óticos estão alinhados, o aumento de partículas de fumo na sua presença, vai diminuir a receção de luz, que depois de um limite faz acionar o alarme.



Detetação	PM
Tamanho PM	>1 μm
Medição mín	0 partículas/283 ml
Medição máx	8000 pcs/283ml
Consumo	90 mA
Tempo de estabilização	1 min

Figura 3.15: PM Sensor PPD42NS
(Retirado de [134])

Tabela 3.12: Características [134]

Estes mesmos princípios fotoelétricos podem ser utilizados para a leitura de partículas mais pequenas [135].

São duas tecnologias distintas, mas que se podem complementar. O sensor de ionização tem uma resposta rápida na presença de um fogo forte mas com pouco fumo (incêndio “limpo”, onde o fumo é praticamente invisível a olho nu), enquanto que o fotoelétrico tem mais facilidade em identificar incêndios fumegantes. Por esta razão é considerado mais seguro quando um sistema de deteção de fumo utiliza os dois sensores [136].

3.6 Sensores de velocidade do vento

Os sensores de velocidade do vento são também conhecidos por anemómetros. Existe uma grande variedade de metodologias para conseguir medir ou estimar esta grandeza, como por exemplo anemómetros de fio quente e ultra-sons. No entanto, na área de meteorologia, os dois mais utilizados são os anemómetros de copos e de hélice [137].

3.6.1 Anemómetro de copos

A medição da velocidade do vento através de um anemómetro de copos é feita com o recurso a copos (tipicamente três ou quatro) com a superfície aberta na vertical montados no mesmo número de braços. Os braços são instalados de modo a que eles formem entre si um ângulo de 90° no plano horizontal e os copos estejam virados na mesma orientação angular. Desta forma, a existência de vento em qualquer direção provoca uma deslocação dos copos proporcional à sua velocidade. Como a deslocação é conhecida, a medição do tempo entre copos permite calcular a medida pretendida. A proporcionalidade entre a movimentação dos copos e a velocidade do vento é direta e depende das dimensões dos braços e dos copos [138].

A Figura 3.16 ilustra o anemómetro de copos de uma estação de meteorologia e a Tabela 3.13 a única característica disponível no site do seu fornecedor.

3.6.2 Anemómetro de hélice

O segundo tipo de anemómetro comum é o tipo hélice, onde um braço roda sobre um eixo horizontal orientado por um cata-vento. Esta orientação leva a que uma hélice esteja



Figura 3.16: ADS-WS1 anemometer
(Retirado de [139])

Velocidade $2.4 \text{ km/h} = 1 \text{ volta/s}$

Tabela 3.13: Características [140]

sempre perpendicular ao vento, no eixo vertical. Por consequência, o vento provoca uma movimentação da hélice, cuja velocidade angular é diretamente proporcional à velocidade do vento e dependente das dimensões físicas da hélice. Este momento angular é utilizado para a geração do sinal elétrico, o que pode ser das mais diversas formas, tais como corrente contínua ou alternada, geração de pulsos magnéticos ou contador de voltas [141].

A Figura 3.17 apresenta um exemplo de um anemómetro de hélice e a Tabela 3.14 as suas principais características. Como se pode observar, este anemómetro não é só capaz de medir a velocidade do vento como também a sua direção. Pela sua exatidão, ampla gama de leitura, robustez física e custo (centenas de euros), este é um produto profissional e por isso não indicado para o género de aplicação em causa nesta dissertação.



Figura 3.17: Marine Wind Monitor - 05106 (Retirado de [141])

Anemómetro:

Velocidade máx. 100 m/s
 Velocidade mín. 1.1 m/s
 Exatidão $\pm 0.3 \text{ m/s}$

Anemoscópio

Azimute mecânico 360°
 Azimute elétrico 355°
 Exatidão $\pm 3^\circ$

Tabela 3.14: Características
[141]

3.7 Sensor de direção do vento

Na medição da direção do vento é utilizado um cata-vento montado num braço num eixo horizontal. Ventos laterais orientam o cata-vento até que o braço aponte na mesma direção que o vento. Para a geração do sinal é comum a utilização de um potenciômetro, o que resulta numa resistência específica para cada grau. Existe, no entanto, outras formas de medir o

ângulo entre o braço e a referência, tais como interruptores rotativos e codificadores óticos.

A Figura 3.18 ilustra um sensor de direção do vento de baixo custo e as suas principais características encontram-se na Tabela 3.15. Neste sensor, ao contrário de um potenciômetro, é utilizado um conjunto de oito resistências de valor diferente ligadas ao mesmo nó. Com um interruptor magnético, o braço do cata-vento faz passar corrente em uma ou duas resistências, o que possibilita a leitura de uma resistência específica para 16 ângulos distintos [140].



Figura 3.18: Marine Wind Monitor - 05106 (Retirado de [139])

Direções	16 (Norte, Sul, Este, Oeste; Nordeste, Noroeste, Sudeste, Sudoeste e pontos intermédios)
----------	--

Tabela 3.15: Características [139]

3.8 Sensores de Precipitação

Os sensores de precipitação são também conhecidos por udômetros ou pluviômetros e são usados para medição da precipitação de água no estado líquido. O método mais comum de medição consiste na utilização de um balde basculante [142]. Quando uma báscula acumula água, esta inclina-se para um lado e desta forma fecha momentaneamente um circuito que pode ser detetado por um micro-controlador ou contador. Ao mesmo tempo, a inclinação do báscula provoca o seu esvaziamento, ficando o balde pronto para, com uma segunda báscula, se inclinar para o lado oposto. Conhecido o volume do balde, a precipitação pode ser calculada pela contagem dos movimentos da báscula [139].

A figura 3.20 ilustra a estação meteorologia completa da empresa Argent Data Systems, utilizada nesta dissertação.



Figura 3.19: ADS-WS1 Rain Gauge, Argent Data Systems (Retirado de [139])

Tipo	Balde Basculante
Medição Unitária	0.2794 mm

Tabela 3.16: Características [139]



Figura 3.20: ADS-WS1 Weather Station (Retirado de [140])

Capítulo 4

Descrição do Sistema

Este capítulo tem como objetivo a descrição do sistema que resultou do trabalho prático desta dissertação. Para esse fim, cada elemento pertencente ao sistema é caracterizado de acordo com as suas funções e especificidades. É também descrito como os elementos interagem entre si.

A figura 4.1 representa o diagrama de blocos do sistema, onde se encontram todos os seus elementos, seguidamente descritos.

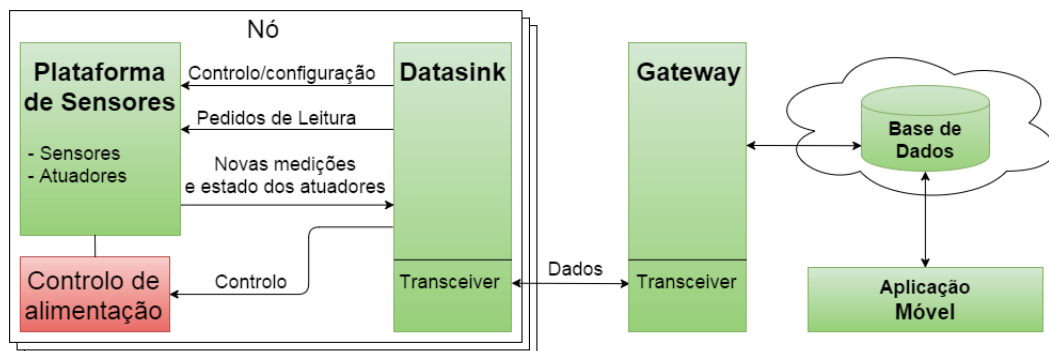


Figura 4.1: Diagrama de Blocos do Sistema

4.1 Elementos do sistema

4.1.1 Plataforma de sensores

A plataforma de sensores é o dispositivo responsável pela leitura de diversos parâmetros relacionados com a qualidade do ar.

Para implementação deste sistema foi disponibilizada uma plataforma de sensores desenvolvida pela Micro I/O, composta por diversos sensores e um micro-controlador (MCU).

Os sensores disponibilizados para esta dissertação são apresentados na Tabela 4.1.

O MCU é o único elemento da plataforma responsável pelo controlo e comunicação com os sensores e só esta unidade é que comunica com o exterior. Para estabelecer comunicação com o micro-controlador, designado por Datsink, foi utilizado uma porta UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*).

ID	Leitura	Nome	Un.	Gama
S1	Temperatura	MaxDetect	°C	-40 a 80
S2	Humidade	RHT03	%	0 a 100
S3	Precipitação	Weather Sensor Assembly 80422	mm	nº de baldes
S4	Velocidade do vento		km/h	nº de voltas/seg
S5	Direção do Vento		graus	0 a 315
S10	CO	NEMOTO NAP505	ppm	0 a 10000
S12	NO ₂	E2v MiCS-2714	ppm	0.05 a 5
S13	O ₃	E2v MiCS-2614	ppb	10 a 1000
S15	Luminosidade	TSL2591	lux	0 a 88 000
S16	Particulas	PPD42NS	partículas/283ml	0 a 28000

Tabela 4.1: Sensores disponíveis na plataforma da Micro IO

4.1.2 Datasink

O Datasink é o dispositivo responsável por:

- Recolha e envio de dados da plataforma para o Gateway;
- Receção e envio de mensagens de controlo do Gateway para a plataforma;
- Gestão direta dos parâmetros de configuração do sensor de luminosidade;
- Controlo direto da alimentação da plataforma de sensores.

Para o estabelecimento de comunicações sem fios, este dispositivo está equipado com um transceptor de rádio-frequência e com o driver do protocolo MiWi da Microchip.

4.1.3 Gateway

Dispositivo responsável pela criação e gestão da rede sem fios MiWi e pela comunicação entre o Datasink e a base de dados. É também responsável por desencadear cada ciclo de leitura aos Datasinks, assim como de leituras regulares de variáveis de controlo da base de dados e de proceder de acordo com os dados obtidos.

Em semelhança ao Datasink, o Gateway está equipado com um transceptor de rádio frequência e protocolo MiWi. Para comunicação com o servidor, tem ligação à rede local por cabo Ethernet pela utilização do protocolo HTTP.

4.1.4 Servidor e base de dados

O servidor é o dispositivo deste sistema responsável por responder a pedidos de leitura ou escrita provenientes da rede e deve ser capaz de fornecer serviços para controlo e monitorização da plataforma de sensores. Para tal, o servidor está equipado com uma base de dados necessária para o fornecimento dos serviços indicados.

4.1.5 Aplicação móvel

A aplicação móvel é o elemento do sistema que permite ao utilizador monitorizar e controlar a plataforma de sensores pela interação de um interface gráfico.

Este elemento deve ser capaz de comunicar com o servidor e de replicar os mesmos serviços que este.

4.2 Modo de funcionamento

Descreve-se, nesta secção, o funcionamento geral do sistema a nível das tramas de comunicação utilizadas entre os diversos elementos. A Figura 4.2 apresenta a estrutura geral do sistema com ênfase nas tecnologias utilizadas para interligar os diferentes elementos do sistema.

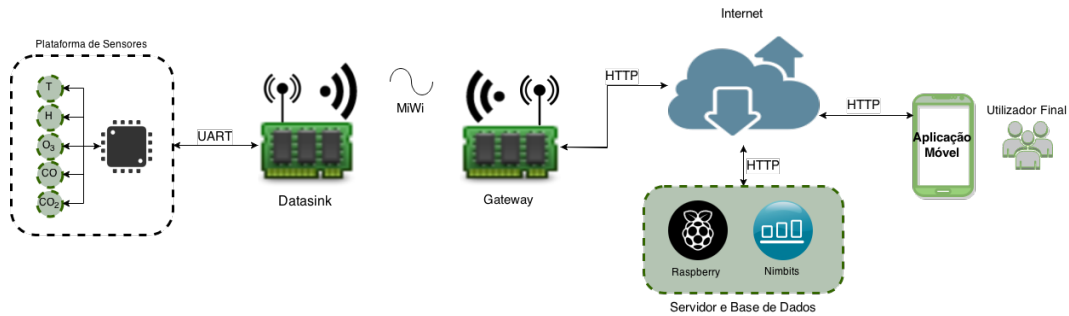


Figura 4.2: Estrutura de rede do sistema

4.2.1 Tramas de comunicação entre plataforma e Datasink

O micro-controlador da plataforma de sensores apenas processa mensagens em código ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) predefinidas, segundo um protocolo da camada de ligação de dados e lidas pelo módulo UART. Neste protocolo, as tramas têm tamanho variável mas todas seguem a seguinte estrutura, representada na imagem 4.3.



Figura 4.3: Estrutura da trama de comunicações da plataforma de sensores.

- **Início:** Caracter '\$' (0x24). Um byte que define o início de cada trama;
- **Tamanho:** 2 bytes que contêm o número de caracteres dos campos Comando, Dados e Soma de Verificação;
- **Separador:** Caracter '|' (0x7C), para separação dos campos. Útil em caso de depuração visual;
- **Comando:** Código que determina a estrutura do campo da Dados;

- **Dados:** Dados que se pretendem transmitir;
- **Soma de Verificação:** Como o próprio nome indica, este campo é usado para a verificação, na receção da mensagem da sua integridade. Este campo é calculado com o resto da divisão de 0xFF com o XOR (OU Exclusivo) de todos os bytes dos campos Comando e Dados;
- **Fim de Trama:** Caracter '#' (0x23), que define o fim de cada trama.

Para efeitos de implementação deste trabalho, apenas foram utilizados os seguintes valores no campo Comando:

- **“RS”:** *ReadSensor*, pedido, ou resposta (comando invertido, 'SR') e respetivo valor, de leitura de um determinado sensor;
- **“HW”:** *HardwareVersion*, usado para determinar a versão de hardware;
- **“FW”:** *FirmwareVersion*, usado para determinar a versão do *firmware*;
- **“SG”:** *SetGain*, utilizado para configuração do ganho e tempo de aquisição dos sensores de luminosidade.

A troca de mensagens mais frequente é o processo de aquisição de leituras, iniciado pelo Datasink. No primeiro passo, o Datasink deve enviar para a plataforma uma mensagem com o comando 'RS', onde o primeiro byte do campo Dados em causa deve ser o carácter 'S' seguido do número identificador do sensor a ler. Depois do carácter ',' deve ser indicado de que forma o valor deve ser apresentado: '1' caso se pretenda o valor convertido (nas unidades de leitura do sensor) ou '0' no caso se pretenda que o valor devolvido não seja modificado. Este último valor vai depender do tipo de leitura de cada sensor.

Exemplo de troca de informação entre a plataforma de sensores e o Datasink, aqui apelidado de Host:

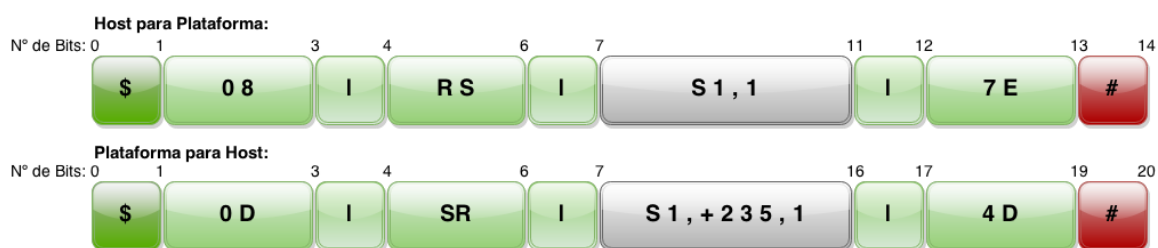


Figura 4.4: Exemplo de troca de mensagens entre Datasink e a plataforma de sensores.

Como se pode observar, o Datasink envia um pedido de leitura do sensor de temperatura, convertido, e o MCU responde com o valor “+235”, ou seja, 23,5°C.

4.2.2 Tramas de comunicação entre Datasink e Gateway

Em semelhança às tramas de comunicação anterior, a comunicação entre o Datasink e o Gateway também acontece com mensagens predefinidas em código ASCII. No entanto, o suporte de envio destas mensagens é através do protocolo MiWi.

Todas as trocas de mensagens são sempre iniciadas pelo Gateway (com a exceção da mensagem de iniciação de um Datasink), que o pode fazer através de três tipos de mensagem:

- **Nova Plataforma:** o Datasink, sempre que é iniciado, difunde a mensagem NP (*New Platform*), de modo a informar o Gateway da sua entrada na rede;
- **Pedido de configuração:** o Gateway envia a mensagem {RN} (*Request Name*), com o intuito de receber informações relativas à plataforma de sensores que o Datasink está a controlar.

Por sua vez, o Datasink responde com uma mensagem do tipo AN (*Answering Name*) onde indica a identificação atribuída à plataforma de sensores [pID], o número de sensores e atuadores que controla e por fim, a identificação de cada sensor ou atuador [nID] em conjunto com o seu tipo de leitura ou atuação, da seguinte forma { AN | pID | # sensores | nID[1], type 1 | nID[2], type 2|... }.

Um exemplo de resposta possível seria: {AN|3|5|1,1|2,2|10,10|12,12|13,13}, onde se pode identificar o tipo de mensagem (AN), a identificação da placa (3), o número de sensores utilizados (5) e de seguida, a identificação de cada sensor assim como o seu tipo. Por exemplo, |1,1| diz respeito ao sensor com ID 1 e que é do tipo 1 (temperatura);

- **Pedido de leituras de todos os sensores:** o Gateway envia a mensagem de pedido {RVA} (*Request Value: All*) com o objetivo de receber uma leitura de todos os sensores e o estado atual de cada atuador ao dispor do Datasink.

Por sua vez, o Datasink responde com um número de mensagens igual ao número de sensores e atuadores, com uma sintaxe semelhante à utilizada na comunicação com a plataforma de sensores.

A formatação da mensagem do Datasink segue a seguinte estrutura:

{AVA|pID|nID|value}, onde AVA (*Answering Value: All*) é o tipo de mensagem, identificando-a como resposta a um pedido RVA, seguido do identificador da plataforma (pID), identificador do sensor em causa (nID), e o valor obtido da leitura da plataforma (value).

Exemplo de mensagem recebida: {AVA|3|1|27.3000}, onde se pode identificar o tipo de mensagem (AVA), a plataforma de sensores com ID 3, e a leitura do sensor com ID 1 (sensor de temperatura) com o valor de 27.3°C.

4.2.3 Tramas de comunicação de acesso à base de dados

A base de dados utilizada neste projeto é o software *open source* Nimbits [147], capaz de receber, guardar, processar e enviar dados correlacionados com tempo ou localização.

Esta base de dados tem vários serviços *REST Web Services* a ela associados, que podem ser acedidos por pedidos HTTP. Para conseguir utilizar estes serviços é necessário uma conta com registo de e-mail e password, assim como um *Token* de acesso aos dados e o URL (*Uniform Resource Locator*) ou IP do servidor. Estes dados são necessários em todas as mensagens HTTP. Qualquer dado incluído numa mensagem está formatado em JSON (*JavaScript Object Notation*). Estes serviços são utilizados tanto pela aplicação móvel como pelo Gateway. Descreve-se a seguir os mais importantes.

- **Serviço *time*:**

Serviço que retorna o tempo local do servidor em milissegundos, no formato *Epoch*. O pedido deve ser feito com o seguinte URL:

`http://[URL]:[porta]/service/v2/time`

Exemplo de execução do serviço: GET `http://nimbits-home:8080/service/v2/time`

Resposta do servidor: 200 OK, JSON = 1432306279761.

Usando um conversor *online*, é fácil ver que o valor retornado é equivalente a “Sexta-Feira, 22 Maio 2015 14:51:19 GMT”;

- **Serviço *value***

Serviço que retorna ou guarda um valor consoante a indicação de um ponto de dados e o tipo de pedido HTTP (GET para leituras e POST para escritas).

Formatação do pedido:

GET `http://[url]:[porta]/service/v2/series?email=[email]&id=[email]/[ponto]&token=[token]`

onde [url] significa o URL ou IP do servidor, [porta] é o número da porta do servidor a aceder, [email] é o *e-mail* da conta do utilizador, [ponto] é o nome do *datapoint* a ler ou escrever e o [token] é a palavra passe criada para os pontos de dados daquele utilizador.

Exemplo de envio de pedido de leitura: GET `http://nimbits-home:8080/service/v2/value?email=iot.angelop@gmail.com&id=iot.angelop@gmail.com/exp&token=temp1234`

Resposta: 200 OK, JSON = {"d": 23, "t": 1432306289761, "dx": "", "st": 3}.

O objeto JSON, na resposta do servidor, significa que o ponto de dados “exp” tem o valor 23 guardado às 14 horas, 51 minutos e 29 segundos no dia 22 de Maio de 2015. Os campos “dx” e “st” correspondem a uma frase associada ao ponto de dados, que pode ser ignorada pois não é utilizada neste trabalho.

Em caso de POST, o objeto JSON é enviado no pedido onde a resposta do servidor é apenas a confirmação de receção da mensagem. O novo valor a guardar pode ser enviado com um carimbo temporal, mas caso não o seja, este é guardado com a hora atual do servidor.

Para ser corretamente identificado pelo sistema, o nome de cada *datapoint* deve seguir a seguinte estrutura: “p[pID].nID.tipo”;

- **Serviço *create missing***

Serviço de criação de um ponto de dados, no caso de este ainda não existir. A utilização deste serviço segue a seguinte estrutura:

POST `http://[URL]:[porta]/service/v2/entity?email=[email]&action=createmissing&type=category&token=[token]`

O pedido deve ir com o corpo de mensagem o objeto JSON:

```
{
  "name": "[nome]",
  "entityType": 2,
  "parent": "[email]",
  "owner": "[email]",
  "id": "[email]/[nome]"
}
```

- **Serviço *series***

Serviço que possibilita a leitura de múltiplos valores de um único ponto de dados e a escrita de vários valores em vários pontos de dados na base de dados.

Um pedido de escrita deve ser construído respeitando a seguinte estrutura:

```
POST      http://[url]:[porta]/service/v2/series?email=[email]&id=[email]
          /[ponto]&token=[token]
```

Um pedido de leitura é bastante semelhante a um pedido de escrita, com a diferença de que é possível acrescentar ao URL um de dois campos de configurações. O primeiro, o *count*, define o número de pontos a ler de um *datapoint* e não pode ser superior a 1000 ou inferior a 10. No segundo, os comandos *sd* e *ed* definem uma janela temporal e estabelecem um limite inferior e superior dos pontos a ler.

A formatação do objeto JSON (vetor JSON) respeita a seguinte estrutura:

```
[
  {
    "key": "[e-mail]/[datapoint 1]",
    "values": [
      {"d": [valor 1], "t": [Unix timestamp 1]},
      {"d": [valor 2], "t": [Unix timestamp 2]},
      ...
      {"d": [valor n], "t": [Unix timestamp n]}
    ]
  },
  {
    "key": "[e-mail]/[datapoint 2]",
    "values": [
      {"d": [valor 1], "t": [Unix timestamp 1]},
      {"d": [valor 2], "t": [Unix timestamp 2]},
      ...
      {"d": [valor n], "t": [Unix timestamp n]}
    ]
  },
  ...
  {
    "key": "[e-mail]/[datapoint n]",
```

```

    ...
  }
]

```

A imagem 4.5 apresenta o aspeto gráfico da base de dados, onde se podem ver identificados alguns elementos chave.

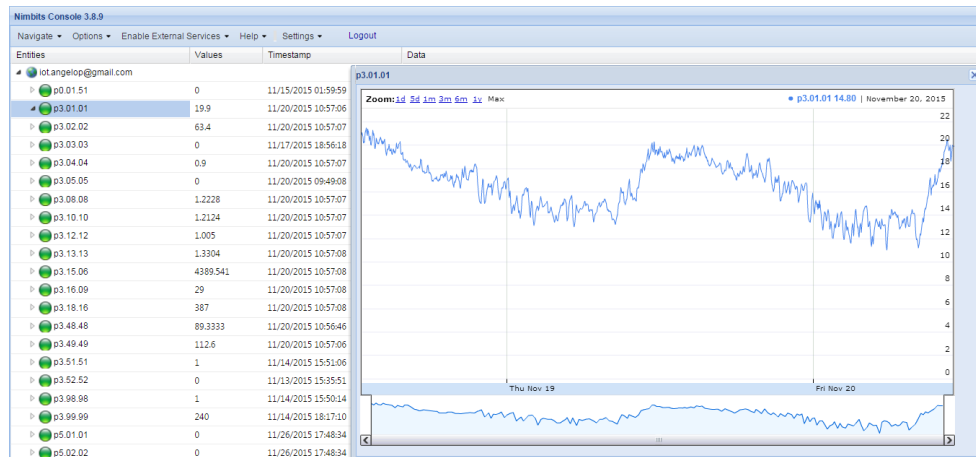


Figura 4.5: Aspeto gráfico da base de dados

4.3 Funcionalidades da aplicação móvel

As funcionalidades oferecidas pela aplicação móvel podem ser divididas em três categorias: configuração do acesso à base de dados, monitorização dos sensores e controlo do sistema.

Na primeira categoria, como podemos ver na Figura 4.6, o utilizador é capaz de configurar o URL do servidor (também é possível a utilização do IP), o *e-mail* a utilizar e a palavra-passe *Token*.

As Figuras 4.7 e 4.8 ilustram as duas mensagens de erro que impedem o bom funcionamento do programa que a aplicação é capaz de identificar. Estas duas situações apenas podem ser corrigidas pelo utilizador e, como tal, estas mensagens informam-o de eventuais estados irregulares. A figura 4.9 apresenta o fragmento de monitorização da aplicação. Este fragmento está dividido em três partes distintas. Na primeira parte, é possível a identificação das plataformas registadas na base de dados, onde o utilizador pode escolher a plataforma a analisar. Na segunda parte, à esquerda, uma lista discrimina todos os sensores da plataforma escolhida. Para cada sensor é apresentado o último valor guardado e um botão para que o utilizador escolha o sensor a analisar. À direita, pode-se observar um gráfico que apresenta os valores obtidos na janela temporal configurada. É possível manipular o gráfico em termos de *zoom in/zoom out* e de deslizar os pontos do gráfico nos dois eixos. A terceira parte deste fragmento é constituída por um botão no canto inferior esquerdo para forçar a atualização dos valores na listagem de sensores. Junto a este botão é indicado o tempo decorrido desde a última atualização. Finalmente, no canto inferior esquerdo, encontram-se os botões de configuração da janela temporal a observar no gráfico, apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11.

A categoria de controlo, representada na imagem 4.12, é construída de forma análoga ao fragmento de monitorização. Aqui, o utilizador é capaz de mudar algumas variáveis relacio-

nadas com o funcionamento do sistema, assim como controlar dois atuadores (simulados por dois LEDs).

Por fim, o utilizador pode navegar por estes três fragmentos através de um menu, acedido com um deslizar de dedo do exterior da tela esquerda em direção ao centro. A figura 4.13 ilustra este menu, assim como um último fragmento, com uma simples mensagem para o utilizador.

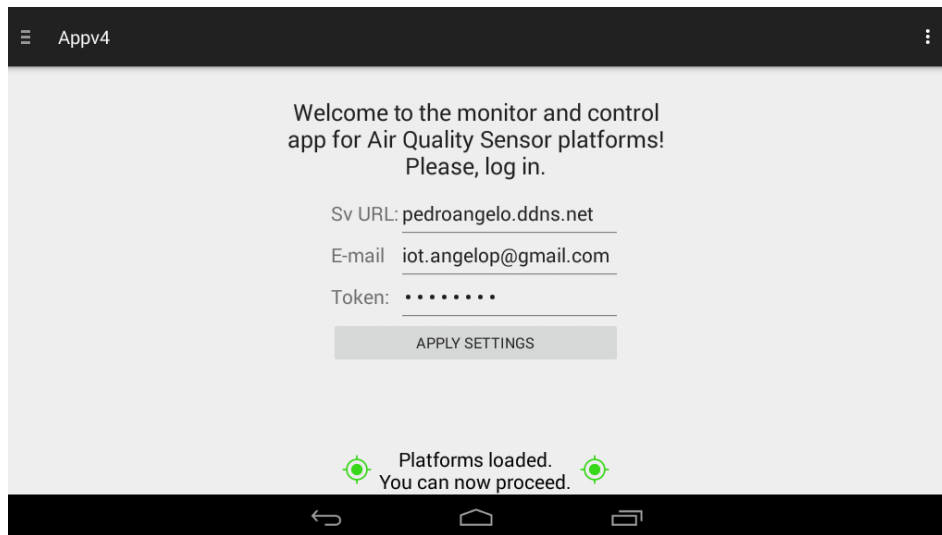


Figura 4.6: Fragmento de configuração da aplicação móvel.

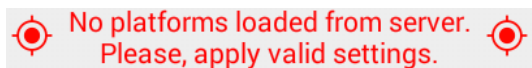


Figura 4.7: Aviso 1.



Figura 4.8: Aviso 2.



Figura 4.9: Fragmento de monitorização da aplicação móvel.

Definir data

			Outubro de 2015							
	S	T	Q	Q	S	S	D			
18	Set	2014	39	21	22	23	24	25	26	27
19	Out	2015	40	28	29	30	1	2	3	4
20	Nov	2016	41	5	6	7	8	9	10	11
			42	12	13	14	15	16	17	18
			43	19	20	21	22	23	24	25
			44	26	27	28	29	30	31	1

Concluído

Figura 4.10: Janela de configuração da data.

Definir hora

14	29
15	30
16	31

Concluído

Figura 4.11: Janela de configuração da hora.

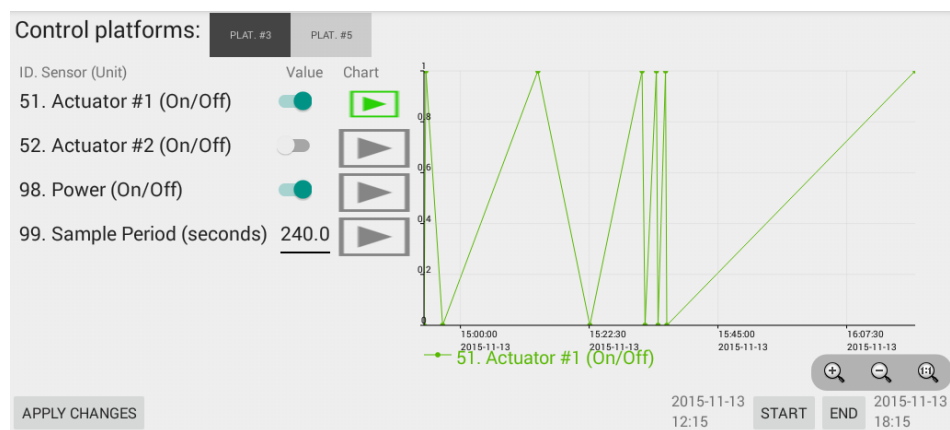


Figura 4.12: Fragmento de controlo da aplicação móvel.

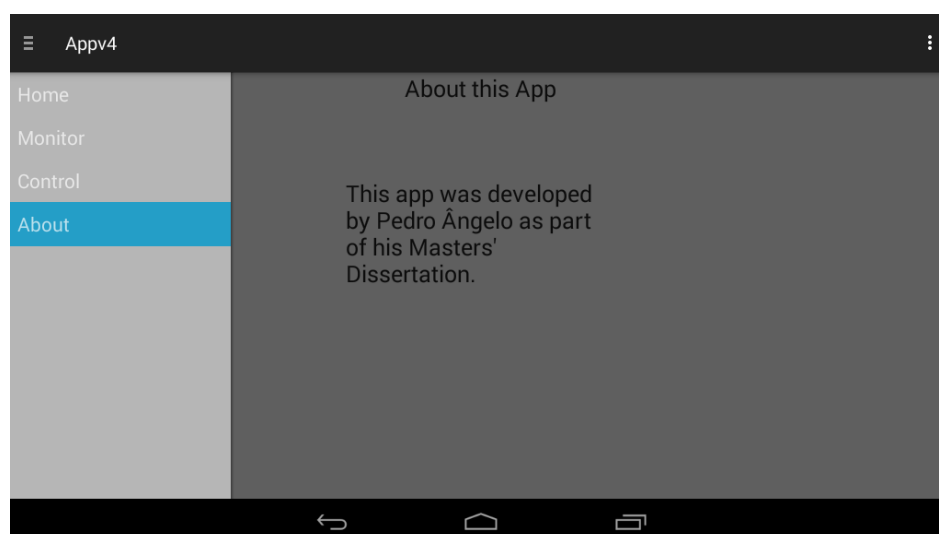


Figura 4.13: Fragmento sobre a aplicação.

Capítulo 5

Detalhes de Desenvolvimento do Sistema

O desenvolvimento deste trabalho pode ser separado em quatro fases distintas. Na primeira fase, o estudo da plataforma de sensores foi obrigatório para obter o conhecimento do protocolo de comunicação utilizado pela UART para obtenção dos dados dos sensores, assim como as variáveis utilizadas para o controle da placa. Com este conhecimento, foi possível desenvolver o código para ligar o micro-controlador à plataforma.

Na segunda fase deste trabalho o protocolo MiWi foi utilizado para estabelecer comunicação entre dois micro-controladores. Um dos micro-controladores, o Datasink, foi ligado a uma plataforma de sensores, o segundo micro-processador, o Gateway, foi ligado ao servidor através da rede local e foi criado o *firmware* que permitiu a escrita de informação na base de dados. Seguidamente, o *firmware* foi desenvolvido para permitir o controle individual de plataformas através da leitura de informação da base de dados.

Na terceira fase foi instalado e configurado a base de dados *open-source* Nimbits no Raspberry Pi que irá servir como servidor.

Na última fase de implementação, foi desenvolvida uma aplicação Android para monitorização e controle de todos os aspetos relacionados com a plataforma de sensores.

5.1 Escolha do protocolo de interface entre micro-controladores

Como apresentado no Capítulo 2.3, existem três opções bastante viáveis para o desenvolvimento proposto neste trabalho: Bluetooth Low Energy, MiWi e Wi-Fi.

O mercado atual oferece uma grande variedade de módulos transdutores para os três protocolos. A Tabela 5.1 apresenta opções viáveis para o desenvolvimento do trabalho proposto nesta dissertação, assim como as suas principais propriedades. Estão representados dois transdutores Microchip para a tecnologia MiWi, um transdutor da Wireless-Tag e outro da Silicon Labs para o BLE, e um transdutor da Espressif Systems para Wi-Fi. É possível observar que todas as tecnologias oferecem uma taxa de transmissão de dados comparável e utilizam a mesma largura de banda. Observa-se alguma flexibilidade na potência e sensibilidade de cada antena, o que resulta em distâncias máximas de comunicação variadas. É também possível verificar que a tecnologia BLE é a que oferece uma melhor eficiência energética, seguido muito de perto pelo primeiro transdutor da Microchip. O transdutor Wi-Fi revela o maior consumo. Relativamente ao custo, os transdutores da Microchip são os mais caros e os da tecnologia

BLE os mais baratos.

Após esta análise, foi escolhido o protocolo MiWi com a utilização do transceptor MRF24J40MA pelas seguintes razões:

- Bom equilíbrio entre eficiência energética, taxa de transferência de dados e distância máxima de comunicação;
- Oferta da topologia em malha, que se enquadra no meio onde a aplicação será instalada - possibilidade de ampliação do sistema para outras finalidades de monitorização e/ou controlo em domótica ou IoT;
- Flexibilidade protocolar, o que possibilita uma forte adaptação da tecnologia à aplicação em causa e futuros desenvolvimentos;
- Simplicidade de aplicação e utilização em regime de desenvolvimento;
- Conhecimento e experiência anteriores com o ambiente de desenvolvimento da Microchip.

		MiWi ^a		BLE ^b		Wi-Fi ^c
Módulo		MRF24J40MA	MRF24J40MC	BGM111	WT51822-S4AT	ESP8266
Taxa Tranf. máx.	[kbps]	250		100	236.7	TCP: 56 UDP: 152
LB	[GHz]	2.405-2.48 GHz		2.402-2.48 Ghz	2.4 GHz	2.412-2.484 GHz
Ant. Output / Sensivity	[dBm]	0 / -94	+19 / -108	+8 / -93	+4 / -40	+19 / -75
RSSI		Sim		Sim	Sim	Sim
Distância Máx. (LOS)	[m]	120	1200	200	45	366
Consumo	Sleep [uA]	2	12	1.7	0.4	10
	Rx [mA]	23	25	7.5	13	60
	Tx [mA]	19	120	8.2	10.5	145
Preço/pcs	[€]	8.1	14.41	5.17	3.73	6.47

^a [148, 149];

^b [150, 151, 152, 153, 154];

^c [155, 156, 157, 158];

Tabela 5.1: Comparação de módulos das três tecnologias

5.2 Micro-controladores

Para estabelecer uma comunicação sem fios de baixo consumo são utilizados módulos μ MRF, desenvolvidos pela Micro I/O. Cada módulo é constituído por um microprocessador dsPIC33FJ256MC710, de 16 bits, um transceptor de 2,4GHz MRF24J40MA, uma porta USB com ligação à UART do microprocessador, dois LEDs e dois botões. Na implementação da rede MiWi foi utilizado o suporte fornecido pela Microchip para o desenvolvimento deste género de aplicações.

É seguidamente descrito o algoritmo usado em cada micro-controlador, o Gateway e o Datasink, assim como alguma especificidade relevante de cada um.

5.2.1 Micro-controlador como Gateway

De modo a obter acesso à rede local foi necessário a inclusão do módulo ENC28J60 ao micro-controlador, desenvolvido pela Microchip e adaptado pela Micro I/O, que permite ao μ MRF ligar-se à rede local via cabo Ethernet com a ficha RJ45.

Para comunicação entre o Gateway e o servidor foi escolhido o protocolo HTTP devido, principalmente, ao conhecimento adquirido em experiências anteriores com este protocolo. Utilizou-se o *driver open source* TCP/IP Stack [159] produzido pela IBEX, uma empresa inglesa de design de produtos eletrônicos. Para usar a funcionalidade cliente de HTTP, foi necessário a implementação das *stacks* TCP. Foi também utilizado a *stack* ICMP para realização de testes de conexão, através de *pings*. O Gateway foi configurado para ter um IP fixo, 192.168.1.127, e não foi ativado a *NetBios*, nem a *stack* UDP.

A Figura 5.1 apresenta o fluxograma do *firmware* utilizado neste micro-controlador, sendo que a preocupação principal no seu desenvolvimento foi a escrita de código não bloqueante de modo a garantir que o processamento das *stacks* acontecesse de forma regular no tempo.

Como se pode observar, no início do algoritmo, são inicializadas as *stacks* de comunicação, nomeadamente dos protocolos MiWi e HTTP. É enviado uma mensagem *broadcast* de configuração para a rede MiWi. São também configurados todos os aspetos relacionados com o microcontrolador, tais como pinos I/O, interrupções e relógios. A primeira ação, no início do ciclo principal, é o processamento das *stacks*. Seguidamente, processa-se a máquina de estados:

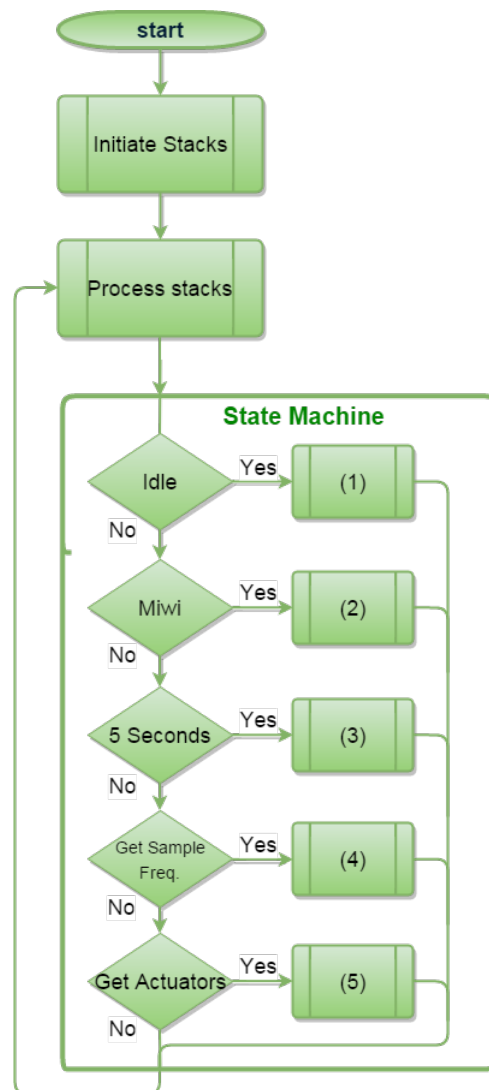


Figura 5.1: Fluxograma do *firmware* Gateway.

- (1) Estado “Idle”: verificação da conexão da rede local e caso esta não esteja presente a *Stack* é reinicializada; verificação do estado da *Stack* MiWi e caso haja uma nova mensagem, esta é lida e garante-se que será processada no próximo ciclo da máquina de estados; todos os transdutores são analisados e caso haja alguma modificação, as novas informações são enviadas para o servidor;
- (2) Estado “MiWi”: nova mensagem MiWi é processada, independentemente do seu tipo.

Este estado é despoletado quando uma mensagem é recebida no estado “Idle”;

- (3) Estado “5 Seconds”: leitura da variável de controlo do servidor, utilizada para proceder a alterações relacionadas a plataformas, sejam elas de configuração ou de atuadores. É verificado o período de medida de cada plataforma ativa e caso seja altura de nova leitura, é enviado o pedido de mensagem MiWi. Este estado é despoletado de 5 em 5 segundos por uma verificação de um contador no início de cada ciclo;
- (4) Estado “Get Sample Freq.”: leitura da base de dados dos *datapoints* correspondente ao período de leitura de todas as plataformas. Este estado é despoletado quando a variável lida no ponto (3) é igual a 1;
- (5) Estado “Get Actuators”: leitura da base de dados de todos os *datapoints* tipo atuadores associados a uma plataforma. Este estado é despoletado quando a variável lida no ponto (3) for superior a uma constante ORDER_CONST (no caso presente, 100), onde a indicação da plataforma a atualizar é identificada pela subtração do valor lido menos a constante pré-definida. Exemplo: quando o valor lido é 103, a plataforma identificada é a pID# 3.

Para a organização de um número não definido de plataformas com um número desconhecido de sensores e atuadores, foi criada a seguinte estrutura:

NIMBITS_LOGIN	PLATFORM	NODE_POINT
1 - BYTE email[30];	1 - BYTE platformID;	1 - BYTE pID;
2 - BYTE password[20];	2 - BYTE isActive;	2 - BYTE nID;
3 - BYTE server[25];	3 - BYTE nNodes;	3 - BYTE type;
4 - BYTE token[15];	4 - MIWI_TICK t1,t2;	4 - FLOAT val;
	5 - NODE_POINT node[MAX_SA];	5 - BYTE status
		6 - BOOL createMissing;

Figura 5.2: Estruturas de dados no Gateway.

A informação utilizada para comunicação com o servidor está armazenada com a estrutura descrita em NIMBITS_LOGIN. Como se pode observar, é necessário um email válido e correspondente palavra-passe, o IP do servidor e o token de acesso aos *datapoints*.

A estrutura PLATAFORM é utilizada como vetor, presentemente configurado com tamanho 3. Na receção de uma mensagem de configuração, vinda de um novo Datasink, é encontrada a primeira entrada livre do vetor e a plataforma é escrita em conformidade com a mensagem. A variável isActive é utilizada para identificar as plataformas ativas e este valor é apenas diferente de zero quando a entrada correspondente foi escrita. As variáveis t1 e t2, do tipo MIWI_TICK, formam um contador que é utilizado para medir o período de medida. A variável nNodes corresponde ao presente número de NODE_POINTS utilizados no vetor “node”.

Um NODE_POINT pode representar um sensor, um atuador, ou uma variável de configuração da respetiva plataforma, consoante o valor atribuído à variável “type”. É relevante apontar que o identificador do nó (nID) é independente do índice e do seu “type”, o que permite a cada plataforma ter vários sensores ou atuadores do mesmo tipo com funções distintas. A variável “type” identifica, portanto, o tipo de nós: a gama de valores entre 1 e 50 está

destinada para sensores, onde duas constantes estão reservadas para a monitorização do canal de comunicação sem fios entre módulos através dos indicadores RSSI e LQI (*Link Quality Indicator*)¹; a gama de valores entre 51 e 99 identifica atuadores com duas constantes reservadas, a primeira para o período de tempo, em segundos, entre medidas e a segunda para o controlo da alimentação elétrica da plataforma (ligado/desligado). A constante MAX_SA é o número máximo de entradas no vetor “nodes”, configurado presentemente com o valor 15 mas passível de modificação. A variável booleana createMissing é utilizada para identificar um nó novo, o que significa que qualquer pedido HTTP ao servidor deve ser precedido da utilização do serviço *createMissing* para garantir que o *datapoint* existe na base de dados. A variável “status” é utilizada para indicar informação relevante sobre o valor atual guardado no FLOAT “val”, podendo ter as seguintes constantes:

- STATUS_UPDATE_HTTP: indica quando uma variável deve ser atualizada na base de dados;
- STATUS_UPDATE_MIWI: indica quando uma variável deve ser atualizada numa plataforma;
- STATUS_WAITING: indica que um dos dois estados anteriores já foi executado e que se deve esperar até novo valor.

5.2.2 Micro-controlador como Datasink

O funcionamento do micro-controlador como Datasink é análogo ao Gateway, com a diferença que não tem a *stack* HTTP, mas sim todo o *firmware* necessário para comunicar com a plataforma de sensores.

Sempre que o Datasink é iniciado, é enviado um *broadcast* para a rede MiWi com a mensagem de nova plataforma de modo a que o Gateway seja informado que esta plataforma acabou de entrar na rede e envia de volta o pedido de configuração. Caso esta plataforma já tenha uma entrada na tabela do Gateway, quando o Datasink envia a resposta de configuração, esta é re-escrita. Desta forma, o sistema é capaz de recuperar de uma eventual falha de comunicação ou alimentação elétrica sem intervenção humana. Adicionalmente, no ciclo *Idle* do Datasink foi implementado a função *sleep*, que desliga o transceptor e interrompe o processamento do microprocessador durante 4 segundos.

A informação relativa aos sensores que compõem a plataforma são guardados na mesma estrutura NODE_POINT que no Gateway e iniciados antes da entrada na máquina de estados. Neste caso, o valor de *status* pode tomar os seguintes valores pré-determinados:

- STATUS_WAITING: indica que esta variável está a espera de nova ordem de leitura;
- STATUS_READ_VAL: indica que o micro-controlador deve proceder ao envio de pedido de leitura à plataforma;
- STATUS_READING: indica que o micro-controlador enviou uma mensagem de leitura para a plataforma de sensores e espera uma resposta;
- STATUS_UPDATE_MIWI: indica que esta variável já recebeu o resposta ao pedido de leitura e pode proceder ao envio da atualização do valor para o Gateway;

¹ Um indicador da qualidade do meio de acesso fornecido pelo protocolo em questão

- **NEW_CONTROL**: indica que esta variável recebeu uma nova ordem de controlo e que se deve proceder à sua modificação física.

A Figura 5.3 ilustra o circuito usado para o controlo, através de uma porta digital do Datasink, da alimentação elétrica da plataforma de sensores. A utilização deste circuito foi necessária para contornar um erro na plataforma, onde um pedido de leitura do sensor de temperatura não retornava qualquer resposta. Como este erro acontece aleatoriamente após a iniciação da plataforma, foi também necessário desenvolver um algoritmo simples para identificação da falha de comunicação. Cada pedido de leitura é acompanhado por um *watchdog timer*, que é desligado quando é recebida uma mensagem da plataforma. Caso haja uma falha de comunicação, o *watchdog* incrementa uma variável contadora e termina o processo de espera do Datasink. A variável contadora, quando chega a um valor predefinido, despoleta a reinicialização da plataforma. A Figura 5.4 apresenta a placa de circuito impresso construída para o efeito. Identifica-se adicionalmente as entradas e saídas do circuito:

- 12 Vcc - Alimentação de 12 V constante;
- 12 V_C - Saída de 12 V controlada pelo micro-controlador, utilizada para a alimentação da plataforma de sensores;
- 5 V - Alimentação do Datasink, 5 V constante;
- In_uC - Entrada do sinal de controlo proveniente do micro-controlador;
- Regulador de Tensão: LM2596.

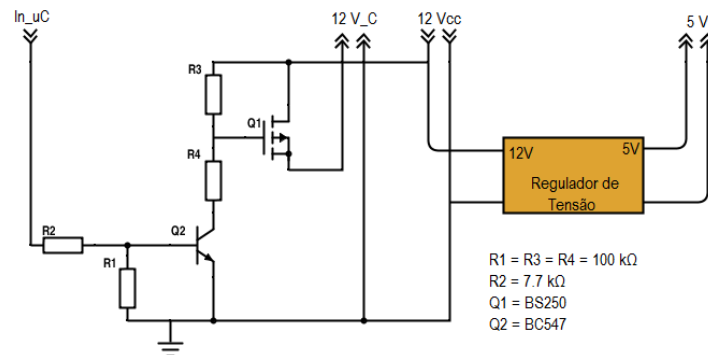


Figura 5.3: Esquema do circuito de controlo da alimentação da plataforma.

5.3 Servidor e base de dados

Como servidor foi utilizado um Raspberry-Pi, versão 1 modelo B, com o sistema operativo Raspbian Wheezy. Este modelo tem 512 MB de memória volátil, duas portas USB e uma porta ethernet de 100Mb.

Como o Gateway, o Raspeberry está ligado à rede local por um cabo de Ethernet com ficha RJ45 e foi configurado com o nome **nimbts-home** e IP fixo 192.168.1.250.

Relativamente à base de dados, a sua instalação é simples e direta. Como configuração são apenas necessários dois passos: o primeiro é a configuração de três serviços temporizados, feitos através de um *Cron Job* do sistema operativo da seguinte forma:

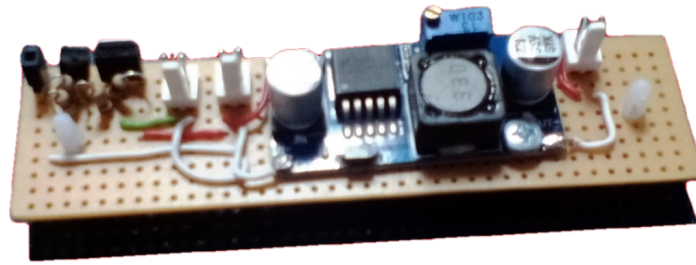


Figura 5.4: Circuito de controlo da alimentação da plataforma.

- `*/2 * * * * wget http://localhost:8080/cron/systemCron`

Utilizado para manutenção dos pontos de dados existentes;

- `*/2 * * * * wget http://localhost:8080/cron/moveCron`

Utilizado para transferir novos dados, guardados em memória RAM, para a memória não-volátil;

- `*/10 * * * * wget http://localhost:8080/cron/pointCron`

Utilizado para desfragmentação da memória utilizada pela base de dados e eliminação de dados expirados.

Estes serviços são chamados a cada 2 ou 10 minutos, indicado por `*/2` ou `*/10`, respetivamente. Os restantes símbolos `*` indicam que a execução destes serviços acontece independentemente da hora, dia do mês, mês ou dia da semana (respetivamente).

O segundo passo é modificar a pasta onde são guardados os *datapoints* visto que a pasta padrão é a `/tmp`, o que significa que cada vez que o Raspberry era desligado, todos os dados até ao momento guardados eram perdidos. Foi criada uma pasta para este efeito e a sua localização foi indicada à base de dados, através da sua GUI (*Graphical User Interface*), no separador de configuração.

5.4 Aplicação móvel

No desenvolvimento desta aplicação foi utilizada uma biblioteca de terceiros para a construção dos gráficos, com o nome de AChartEngine [160].

A aplicação móvel Android consiste numa atividade dividida em cinco fragmentos, um para processamento do menu e os quatro restantes são responsáveis por cada entrada do menu: “Home”, “Monitor”, “Control” e “About”.

A Figura 5.5 ilustra um fluxograma que demonstra o funcionamento geral da aplicação. No primeiro fragmento, é desenhada uma interface gráfica pré-construída, ou seja, com botões e caixas de texto previamente criadas e imutáveis. Aqui, o utilizador introduz a informação necessária para utilizar a base de dados e após o clicar no botão “Apply Changes”, é chamada uma tarefa assíncrona que processa o pedido da árvore de *datapoints* existentes na base de dados e guarda em memória volátil a informação obtida. Adicionalmente, uma caixa de aviso informa o utilizador do estado da aplicação e pode conter três informações distintas:

- Módulo Wi-Fi desligado - o que impossibilita a comunicação com a base de dados;

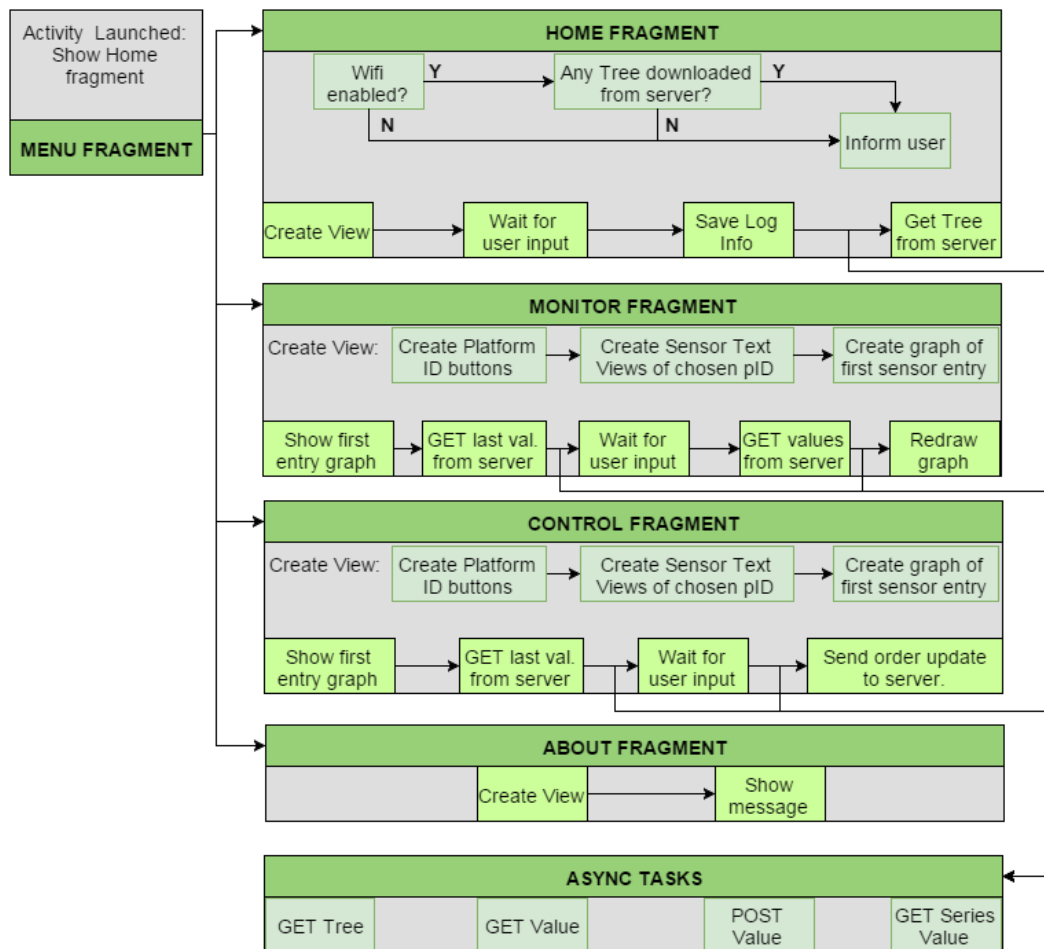


Figura 5.5: Fluxograma da aplicação móvel.

- Nenhuma árvore de pontos em memória - o utilizador ainda não introduziu dados corretos ou ainda não foi ordenado o estabelecimento de uma conexão com o servidor;
- Árvore de pontos corretamente obtida - estabeleceu-se conexão com um servidor válido e uma estrutura de dados conhecida foi recebida.

No fragmento “Monitor” e, analogamente, no fragmento “Control”, a GUI é dividida por uma tabela previamente construída com três linhas e duas colunas. À entrada deste fragmento é processado a informação obtida no *Login*, o que significa a execução das seguintes tarefas:

- Criação dinâmica (criados pelo programa) de botões na primeira linha e segunda coluna da tabela para identificação da plataforma a analisar;
- Criação dinâmica das caixas de texto para identificação dos sensores, respetivos valores atuais e botões de seleção na segunda linha, primeira coluna da tabela num Scroll View²;
- Leitura dos *datapoints* do primeiro sensor indexado relativos às ultimas 24 horas;

² Interface gráfica específica que permite percorrer a informação nela contida através da ordem do utilizador

Sensor	Un. Chegada (x)	Un. Final (y)	Cálculo ^a
Precipitação	Baldes	mm	$y = x * 0.2794$
Vel. do Vento	Voltas	km/h	$y = x * 2.4011$
CO	Volts	ppm	$y = 14492.7536 * x - 17391.3044$
NO ₂	Volts	ppb	$y = 19.2334 * (\frac{30*x}{2.5-x})^{0.4636}$
O ₃	Volts	ppm	$y = 106.196 * (\frac{x}{x-2.5})^{1.1176219}$
PM ^b	ms	pcs/283ml	$r = x/30000$ $y = 1.1 * r^3 - 3.8 * r^2$ $+520 * r + 0.62$

^a Cálculos para a linha de tendência dos sensores CO, NO₂ e O₃ no anexo B;

^b [161].

Tabela 5.2: Tabela de cálculos

- Iniciação, configuração e desenho do gráfico com os valores anteriormente obtidos na segunda linha, segunda coluna da tabela.

Desta forma, a aplicação não está limitada a uma estrutura fixa e pré estabelecida da plataforma de sensores utilizada nesta dissertação, sendo apenas necessário a utilização das mesmas constantes para identificação do tipo de nó (o campo *type* utilizado nos Datasink e Gateway).

Na terceira linha e segunda coluna da tabela, encontram-se os botões de configuração da janela temporal que se pretende observar no gráfico, um para escolha da data e hora de início e outro para o fim. O gráfico é configurado para ser possível o aumento e diminuição do *zoom* tanto por movimento de dois dedos como por clique nos botões de *zoom*. É também possível o arrastamento da linha do gráfico, especialmente útil quando é efetuado um *zoom in*.

Há duas grandes diferenças entre os fragmentos *Monitor* e *Control*. Uma delas é a mudança das caixas de texto fixo, no fragmento de monitorização, para botões on/off e caixas de texto editável no fragmento para controlo. Esta mudança utiliza o *type* de cada nó para identificação do modo correto de introdução. A segunda diferença é a finalidade do botão na terceira linha primeira coluna da tabela. No caso de monitorização, é apresentado um botão para atualização do último valor registado em todas as entradas da lista de sensores. No caso de controlo, o botão é utilizado para o envio da ordem de atualização da plataforma, ou seja, são enviados para a base de dados todos os valores correntes passíveis de modificação referentes à plataforma em causa. A variável de controlo do Gateway é também modificada de modo a indicar qual a plataforma deve ser controlada (PID + ORDER_CONST).

Adicionalmente, as leituras de alguns sensores recebidos do servidor não se encontram na unidade final, pelo que precisam de ser transformadas. Esta transformação é processada na mesma tarefa assíncrona em que foram recebidas e os cálculos utilizados seguem a seguinte Tabela 5.2:

Por fim, o fragmento *About* é utilizado para informar o utilizador do âmbito de desenvolvimento em que esta aplicação se insere.

5.5 *Smartphone*

O *smartphone* utilizado para correr e testar a aplicação desenvolvida neste trabalho foi o Acer Iconia Tab 7, com o sistema operativo Android versão 4.4.2.

Qualquer outro dispositivo Android, com versão igual ou superior à 4.1 e com acesso Wi-Fi, pode executar a aplicação desenvolvida.

5.6 Ferramentas de desenvolvimento

Uma vez que foram utilizados dispositivos eletrónicos distintos no processo deste trabalho, considero relevante indicar as ferramentas utilizadas.

MPLab X, PicKit 3 e ZENA

Para a programação dos micro-controladores, foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado (ou IDE, Integrated Development Environment) MPLAB X da Microchip, um programa gratuito fornecido pela mesma empresa. Esta ferramenta tem incluída funcionalidades que ajudam em todo o processo de desenvolvimento de um programa, tais como editor de texto para a criação de código fonte, compilador e ferramentas para análise e depuração. Este programa trabalha em sintonia com PICkit 3, cuja função é a de programar micro-controladores e proceder à depuração de hardware.

Para visualização gráfica dos pacotes com o protocolo MiWi, foi utilizado o *sniffer* ZENA, da Microchip, que é um adaptador sem fios, com ligação USB (*Universal Serial Bus*). Esta ferramenta de desenvolvimento é utilizada para diagnosticar e analisar a rede sem fios, consoante o protocolo escolhido.

Realterm e PuttY

Para comunicação direta com o micro-controlador, através da UART, foi utilizado o terminal Realterm.

De modo a comunicar com o Raspberry Pi pela rede local, foi utilizado o software Putty, programa especialmente útil para estabelecer sessões remotas entre computadores como cliente. No caso deste projeto, foi utilizado o protocolo SSH (*Secure Shell Protocol*).

Wireshark

Para resolução de problemas relacionados com o uso da *stack* TCP/IP no micro-processador, assim como na análise e depuração na comunicação com o servidor, foi especialmente importante a utilização do analisador de protocolos de rede gráfico Wireshark.

Android Studio

Para o desenvolvimento da aplicação Android foi utilizado o IDE oficial deste sistema operativo, o Android Studio. Baseada em IntelliJ IDEA, este software oferece todas as ferramentas necessárias ao desenvolvimento de uma aplicação, tais como editor de texto, construtor de interface visual, emuladores de dispositivos virtuais e ferramentas de depuração.

Capítulo 6

Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados e discutidos resultados de ensaios realizados de modo a testar a funcionalidade do sistema.

6.1 Alcance prático entre módulos μ MRF

Para a medição do alcance prático entre os módulos μ MRF, utilizados como Gateway e Datasink, foram realizados três ensaios em ambientes distintos, sem nenhum obstáculo na sua linha de vista. Um dos módulos é responsável por enviar uma mensagem por segundo, enquanto que o outro apenas a recebe. Para cada ensaio, os dois módulos foram elevados do chão cerca de 80 cm e a distância aumentada após o módulo recetor ter obtido 230 mensagens. O indicador RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), medido a cada mensagem recebida pelo MFR24J40, é um valor entre 0 e 255 indicador da potência do sinal recebido, que pode ser transformado em potência (dBm) através de uma tabela disponibilizada pelo fabricante no *datasheet* [162]. Os três ensaios são seguidamente descritos.

6.1.1 Alcance exterior não urbano

Este ensaio foi realizado numa zona ampla e pouco movimentada da cidade com o objetivo de conhecer o alcance máximo dos módulos com o mínimo de interferência possível.

A figura 6.3 ilustra o gráfico que relaciona a distância entre módulos e o RSSI. Como se pode observar, o RSSI médio diminui com a distância, o que é um comportamento esperado. A distância máxima alcançada foi de 140 metros. Aos 110 e 140 metros foram registadas, respetivamente, 17 e 2 mensagens perdidas, o que representa 7 e 0.86% de mensagens perdidas a estas distâncias.

6.1.2 Alcance exterior urbano

Este ensaio foi realizado em ambiente urbano no exterior de um edifício o que significa que os sinais enviados pelo módulo transmissor vão sofrer interferências devido à proximidade de obstáculos e presença de outros sinais na mesma frequência (2.4 GHz - por exemplo Redes Wi-Fi). Na Figura 6.1 está representado um mapa dos principais intervenientes neste ensaio.

A imagem 6.4 ilustra o gráfico correspondente a este ensaio. A principal discrepância entre este ensaio e o primeiro é a diferença no RSSI do sinal recebido entre os 8 e os 20 metros. A existência de uma ponte de metal, localizada a uma distância de 16 metros do

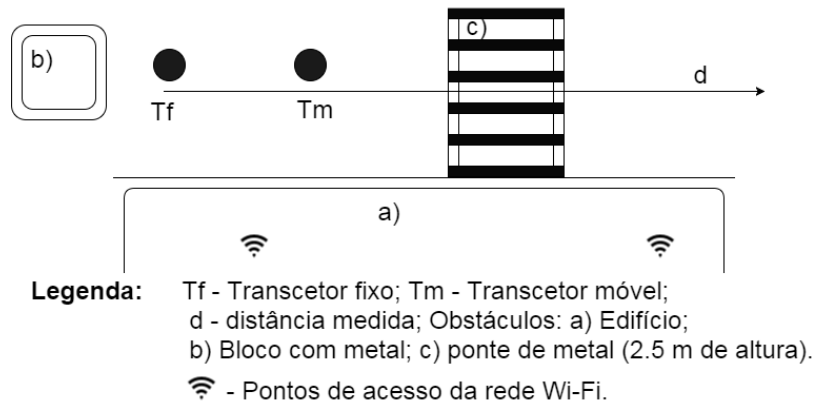


Figura 6.1: Mapa dos componentes principais no ensaio urbano.

módulo transmissor e com cerca de 2,5 metros de altura, provocou reflexões destrutivas a 8 e 12 metros. Observa-se claramente, nestas distâncias, um sinal RSSI com bastante variação e com metade do valor médio observado no primeiro ensaio. A 16 e 20 metros de distância, o valor médio volta ao esperado e as variações diminuem. Note-se também uma ligeira descida no valor médio na potência do sinal a uma distância de 2 metros, provocada por uma parede e metal localizada a um metros atrás do módulo transmissor. Relativamente a perdas de mensagens, apenas à distância de 8 metros foram contabilizadas 4 mensagens perdidas, o que representa uma perda de 1,7%.

6.1.3 Alcance interior

Este ensaio foi realizado num corredor bastante movimentado e com a presença de uma rede Wi-Fi com sinal forte. Na Figura 6.2 está representado um mapa dos principais intervenientes neste ensaio.

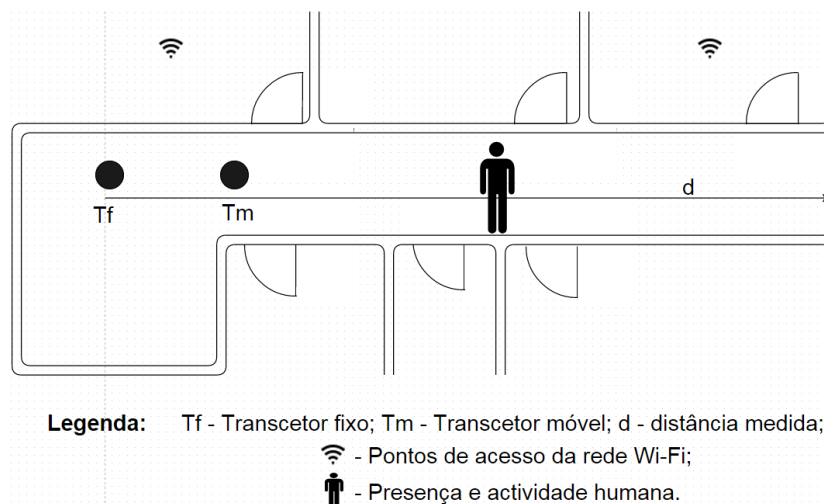


Figura 6.2: Mapa dos componentes principais no ensaio interior.

A imagem 6.5 ilustra o gráfico correspondente a este ensaio. É possível observar que o

valor RSSI é consideravelmente instável, situação que piora criticamente a uma distância de 20 metros, constatado-se uma perda de 32 mensagens (12%). A única distância que apresenta perdas de mensagem, para além da supra-indicada, é a de 8 metros que contabilizou 2 (<1%). Embora o indicador diminua para metade a uma distância de 2 metros, o valor médio para as quatro distâncias seguintes mantêm-se.

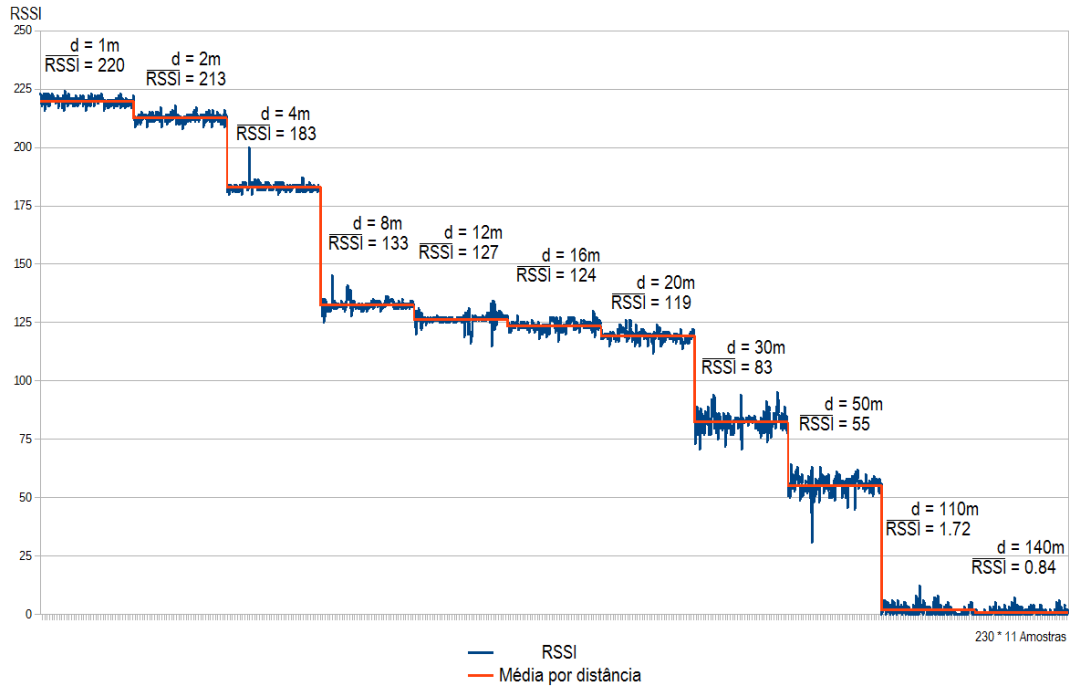


Figura 6.3: Evolução do RSSI no tempo e distância - Exterior Não Urbano.

6.1.4 Observações finais

A tabela 6.1 mostra os valores RSSI médios das distâncias medidas nos três ensaios. Embora a potência média de sinal diminua previsivelmente com a distância entre os módulos, a eficácia da comunicação vai depender principalmente da natureza do ambiente onde os módulos são instalados e das perdas que se considerem aceitáveis em situações críticas. Assim, o estudo prévio da localização destinada à utilização destes módulos é imprescindível, de modo a estabelecer uma comunicação ótima.

Distância	[m]	1	2	4	8	12	16	20	30	50	110	140
Ensaio 1		-44	-46	-52	-61	-62	-63	-65	-71	-77	-88	-90
Ensaio 2	[dBm]	-46	-53	-52	-73	-74	-63	-65	-	-	-	-
Ensaio 3		-44	-62	-66	-62	-	-67	-70	-	-	-	-

Tabela 6.1: Conversão do RSSI médio dos três ensaios

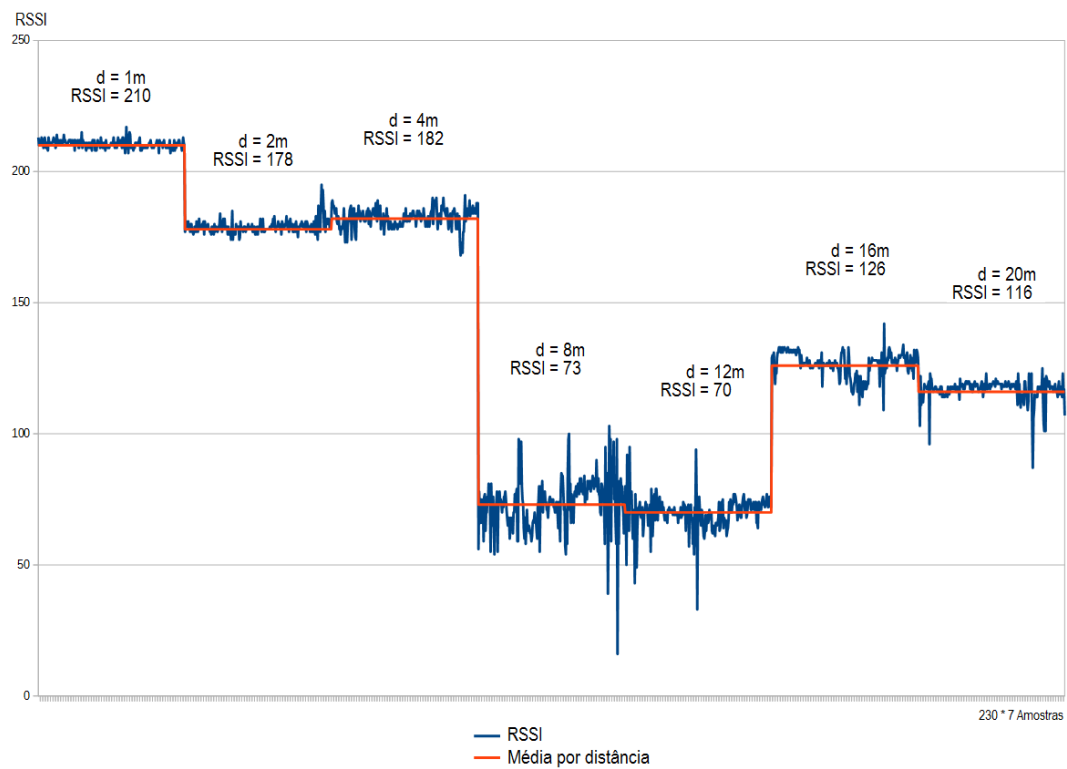


Figura 6.4: Evolução do RSSI no tempo e distância - Exterior Urbano.

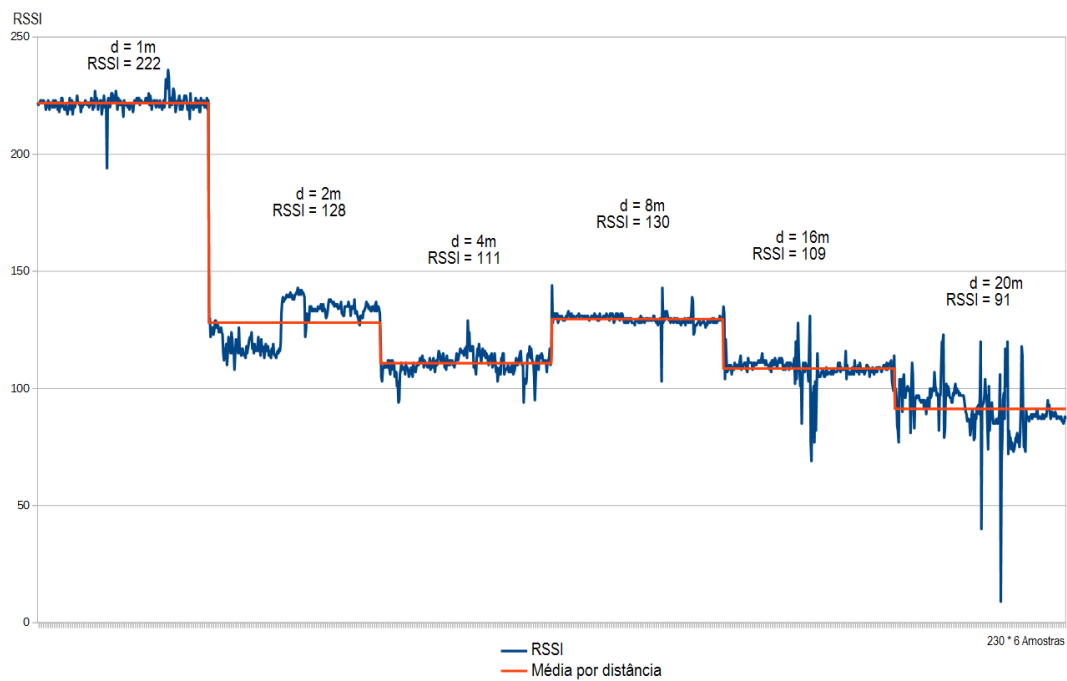


Figura 6.5: Evolução do RSSI no tempo e distância - Interior.

6.2 Análise de Resultados

6.2.1 Ensaio Interior

Este ensaio teve a duração de 32 horas e decorreu desde as 9:45 horas do dia 20 de Outubro, Sexta-Feira, às 18 horas do dia 21, Terça-Feira, no Departamento de Hardware da Micro I/O. Esta sala tem duas portas: uma de acesso ao exterior e outra para a restante empresa. O departamento é ocupado por 11 pessoas em constante movimento, entradas e saídas de colaboradores por ambas as portas é bastante frequente, assim como a utilização do ar-condicionado. A sala é também ocupada por diversos computadores, com cerca de metade constantemente ligados. O período de amostragem foi configurado a 230 segundos e a distância entre Datasink e Gateway de 2 metros.

Temperatura

A Figura 6.6 ilustra o gráfico da temperatura em função do tempo.

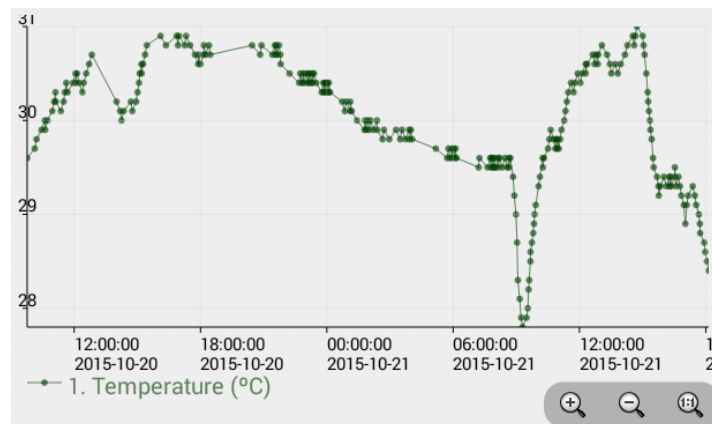


Figura 6.6: Ensaio Interior - Temperatura

Os seguintes aspetos são considerados relevantes:

- Máximo absoluto: 31.0 °C no dia 20 às 14:43;
- Mínimo absoluto: 27.8 °C no dia 21 às 09:17;
- Diminuição lenta e com poucas variações no período de desocupação da sala, entre as 21h do dia 20 e as 8:40 do dia 21;
- Diminuição e aumento acentuado de temperatura, entre as 8:40 e 10:07, justificado pela abertura da porta e influenciado pela temperatura no exterior;
- Aumento acentuado de temperatura das 9:17 às 10:07, justificado pelo início de atividades na sala;
- Falha de comunicação das 12h50 às 14h00 e das 18h28 às 20h26 do dia 20, corrigida para o ensaio exterior.

Esta temperatura, como referenciado na Tabela 2.1, é superior ao limite indicado como confortável.

Humidade

A Figura 6.7 ilustra o gráfico dos valores de humidade em função do tempo, obtidos neste teste. De notar as seguintes características:

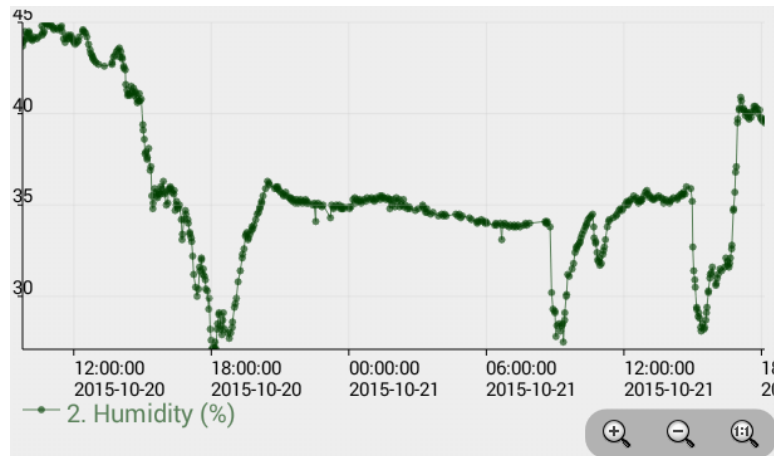


Figura 6.7: Ensaio Interior - Humidade

- Máximo absoluto: 45 % no dia 20 às 10:43;
- Mínimo absoluto: 27.1 % no dia 20 às 18:01;
- Descida com variações acentuadas entre o máximo e mínimo absoluto, expectável em ambientes sem fonte de vapor de água, onde um aumento de temperatura relaciona-se com uma diminuição de humidade relativa [163];
- Em semelhança à temperatura, também a humidade apresenta variações mínimas e diminuição lenta em períodos de não ocupação;
- Diminuição e aumento brusco da humidade relativa na mesma janela temporal apresentada pela variação de temperatura, reforçando a justificação apresentada;
- Aumento acentuado desde as 15:29 do dia 21.

Concentração de CO

A Figura 6.8 apresenta o gráfico que relaciona a concentração de Monóxido de Carbono com o tempo. Como é observável, os valores obtidos diretamente da plataforma não são passíveis de interpretação. Por esta razão, foi implementado um filtro passa baixo IIR (*Infinite Impulse Response*), $y[i] = y[i-1] + \alpha * (x[i] - y[i-1])$ [164]. As Figuras 6.9 ilustram os resultados da aplicação do filtro com $\alpha = 0.04$.

Considera-se os seguintes aspetos relevantes:

- Máximo absoluto (sem filtro): 205.79 ppm, às 9:59 do dia 21;

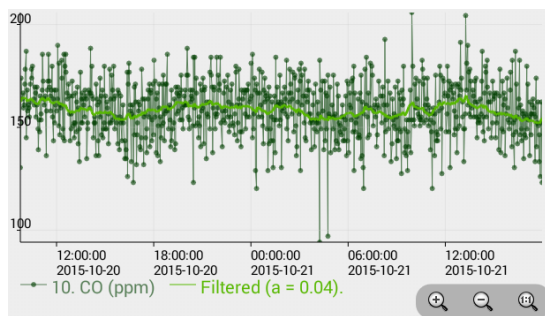


Figura 6.8: Ensaio Interior -
Concentração de CO e aplicação do
filtro

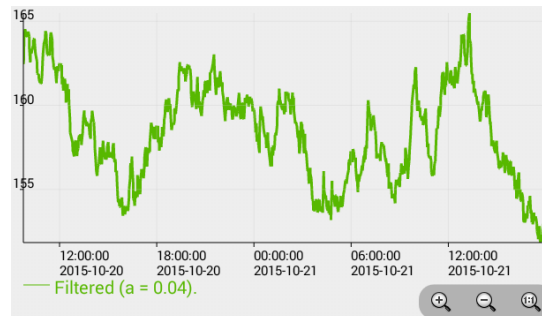


Figura 6.9: Ensaio Interior -
Concentração de CO filtrado
($\alpha = 0.04$)

- Mínimo absoluto (sem filtro): 94.20 ppm, às 4:14 do dia 21;
- Sinal com ruído considerável e variação insuficiente;
- Tendência para diminuição de concentração em períodos de desocupação da sala e aumento em horário de expediente;
- Valores muito acima do indicado (Tabela 2.1) indicam a necessidade de calibração do sensor.

Concentração de NO_2 e O_3

Os gráficos representados nas Figuras 6.10 e 6.11 relacionam, respetivamente, as concentrações de Dióxido de Nitrogénio e Ozono com o tempo. Considera-se importante os seguintes aspetos relativamente a estes dois gráficos:

- NO_2 :
 - Máximo absoluto: 97.4675 ppb às 16:46 do dia 21;
 - Mínimo absoluto: 26.7289 ppb às 11:18 do dia 20;
- O_3 :
 - 854 pontos;
 - Máximo absoluto: 188.2768 ppb às 15:45 do dia 21;
 - Mínimo absoluto: 55.3836 ppb às 14:55 do dia 21;
- Ambos os gráficos aludem a uma relação entre as duas concentrações, pois apresentam picos semelhantes temporalmente aproximados. De facto, as duas substâncias estão relacionadas, pois Ozono é derivado do Dióxido de Azoto por uma reação fotoquímica, como visto no Capítulo 2.2;
- Aumentos e diminuições abruptas podem estar relacionadas com o abrir e fechar da porta exterior, uma vez que não existe fonte emissora destas substâncias óbvias no interior da sala.

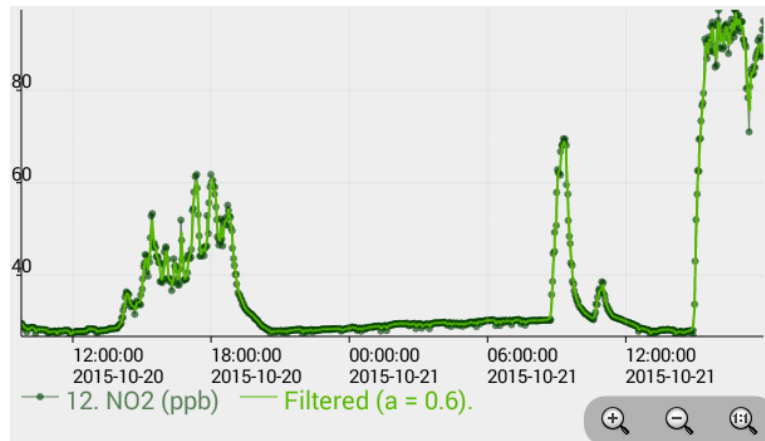


Figura 6.10: Ensaio Interior - Concentração de NO_2 .

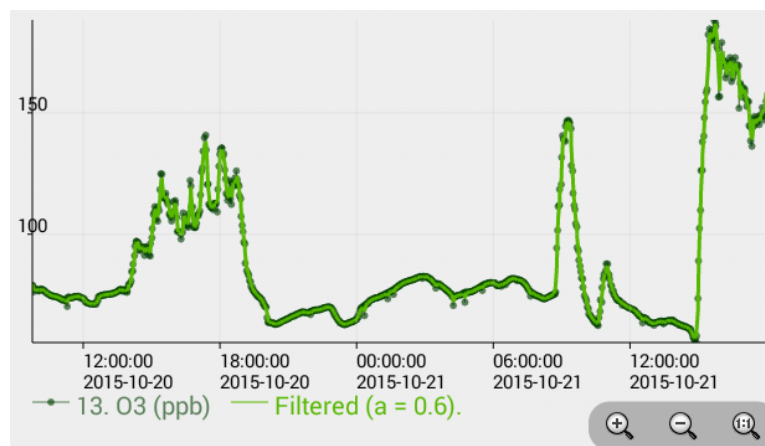


Figura 6.11: Ensaio Interior - Concentração de O_3 .

Luminosidade

A Figura 6.12 apresenta o gráfico que relaciona a luminosidade com tempo.

Foi utilizado o mesmo filtro anterior com $\alpha = 0.8$. É relevante indicar os seguintes pontos:

- Máximo absoluto: 522.77 lux às 20:30 do dia 20;
- Mínimo absoluto: 2.0160 lux às 5:12 do dia 21;
- Sensor colocado perto de uma lâmpada incandescente e sem ângulo de visão para a parede exterior (de vidro), o que justifica a diferença de luminosidade às 18:00 do dia 20: aumento abrupto quando a luz foi ligada;
- Existência de sombras pontuais (movimentação de pessoas na sala) que provocaram leituras isoladas perto de zero e que, pela aplicação do filtro, apresentam as oscilações observáveis entre as 18:00 e 20:30 do dia 20;
- Iluminação da sala desligada às 20:53, traduzida numa diminuição do máximo absoluto de 522.77 lux até 3.3 lux, quando a sala é apenas iluminada por reflexões difusas vindas do exterior e da iluminação do corredor;

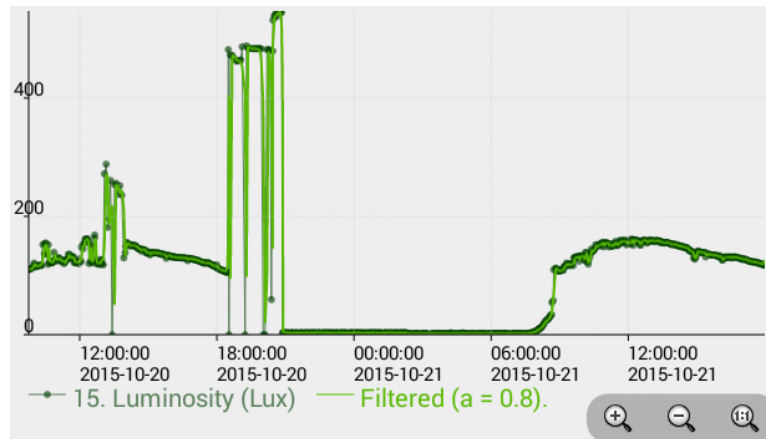


Figura 6.12: Ensaio Interior - Luminosidade.

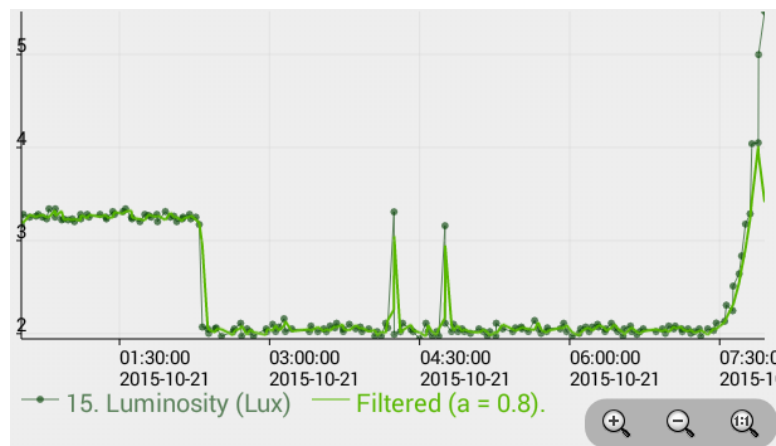


Figura 6.13: Ensaio Interior - Luminosidade (pormenor).

- Como ilustrado na Figura 6.13 o sensor é extremamente sensível, mesmo com níveis de luminosidade bastante baixa, o que comprova o bom funcionamento do *firmware* de configuração do ganho e tempo de exposição do sensor para luminosidades baixas;
- Note-se também na Figura 6.13 o nascer do dia por volta das 7:30, como esperado [165].

Concentração de Partículas

Na Figura 6.14 ilustra-se o gráfico que relaciona a contagem de partículas com tamanho superior a $2.5 \mu\text{m}$ por 283 mL de ar. Como se pode observar, a presença de zeros entre inúmeras medições e a natureza ruidosa do sinal impede a análise dos dados obtidas nesta forma. O mesmo se observa an Figura 6.15 para os dados obtidos para a segunda medição do mesmo sensor, para partículas de tamanho entre 1 e $2.5 \mu\text{m}$.

De modo a conseguir obter alguma informação útil, os zeros foram ignorados e foi aplicado um filtro passa baixo com o coeficiente $\alpha = 0.013$.

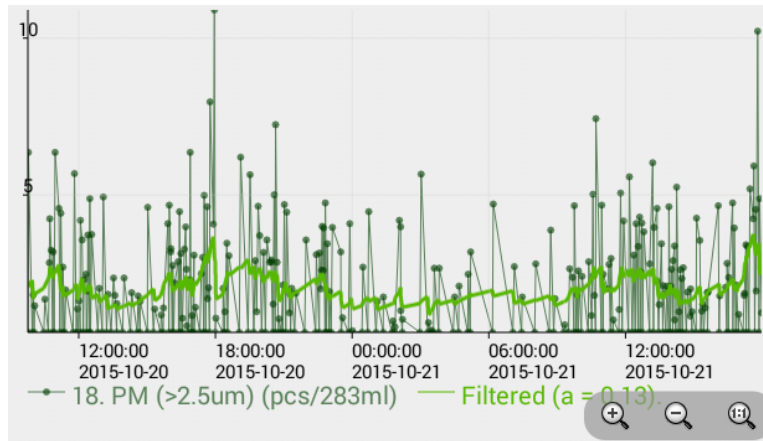


Figura 6.14: Ensaio Interior - Número de Partículas (tamanho superior a $2.5 \mu\text{m}$)

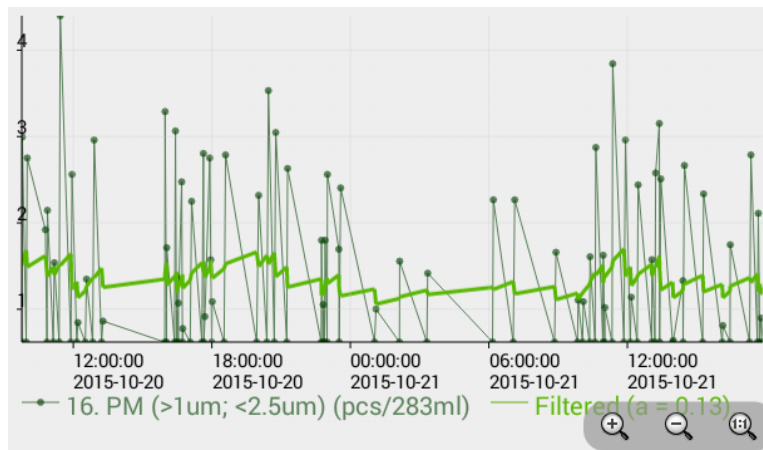


Figura 6.15: Ensaio Interior - Número de Partículas (tamanho entre 1 e $2.5 \mu\text{m}$).

Pela observação dos gráficos é possível afirmar:

- Tendência em diminuição de partículas em períodos de não ocupação da sala e vice-versa para ambos os canais;
- Canal 1 (partículas de tamanho superior a $2.5 \mu\text{m}$) apresenta maior variação de leituras que o Canal 0 (tamanhos entre 1 e $2.5 \mu\text{m}$), tendo os gráficos 123 e 365 pontos respetivamente.

É importante sublinhar que, na utilização de um contador de partículas, os resultados obtidos são úteis apenas como indicador da qualidade do ar e não para uma medição correta da concentração de partículas [166]. Para a transformação dos resultados obtidos por este sensor em unidades SI (*International System of Units*), seria necessário a utilização de equipamentos especializados para calibração que não se enquadram ao âmbito desta dissertação [167].

RSSI e LQI

As Figuras 6.16 e 6.17 ilustram os gráficos dos indicadores RSSI e LQI, respetivamente, em função do tempo.

- LQI com variações mínimas;
- Visível o horário de utilização da rede Wi-Fi local no indicador RSSI:
 - grandes variações devido a interferências do sinal em horário de expediente;
 - pequenas variações no período de não utilização da rede, das 20:15 do dia 20 às 08:44 do dia 21.

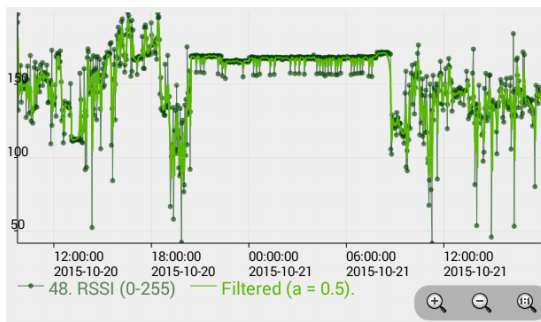


Figura 6.16: Ensaio Interior - RSSI

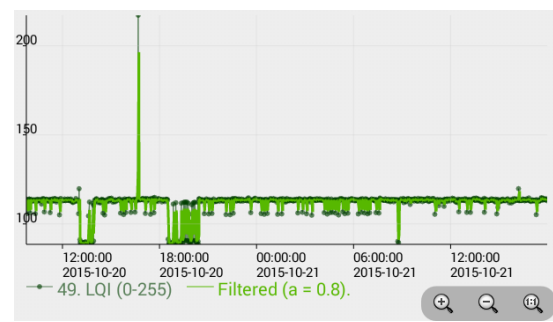


Figura 6.17: Ensaio Interior - LQI

6.2.2 Ensaio no Exterior

Por questões de segurança, não foi possível a instalação do sistema nas imediações da Micro I/O. Por esta razão, o sistema foi instalado no jardim de uma habitação privada, entre uma casa de dois andares e um pinhal. As estradas de acesso são pouco movimentadas e, a 500 metros, encontra-se a auto-estrada A17. A distância entre o Gateway e Datasink foi de 10 metros com uma parede de tijolo entre elas e o período de amostragem foi configurado com o valor de 230 segundos.

Este ensaio teve uma duração de 4 dias, com início às 18h30 do dia 14 de Novembro e conclusão às 18h30 do dia 18. As seguintes figuras ilustram o bom funcionamento geral do sistema, sem falhas de comunicação. Neste ensaio não ocorreu nenhuma precipitação, pelo que as medições deste sensor são omitidas.

Direção e velocidade do vento

Neste ensaio houve oportunidade de testar, em especial, os sensores de velocidade e direção do vento. Devido às condições climáticas, não foram obtidos valores para o sensor de

precipitação, pelo que este sensor é omitido. A Figura 6.18 ilustra o gráfico que relaciona os valores obtidos do sensor de direção do vento com o tempo.

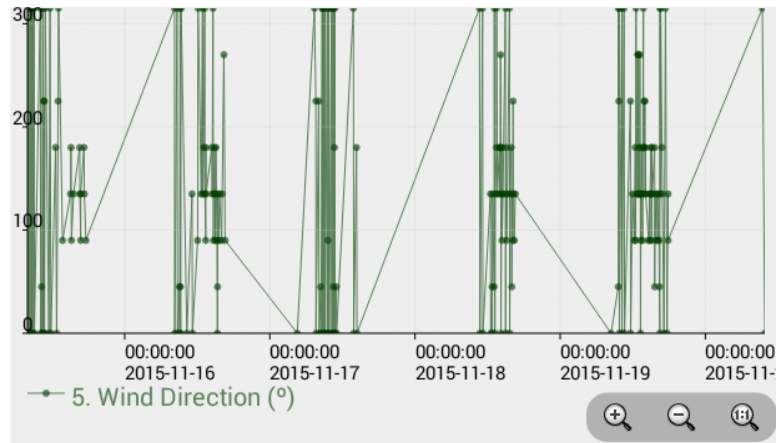


Figura 6.18: Ensaio Exterior - Direção do vento

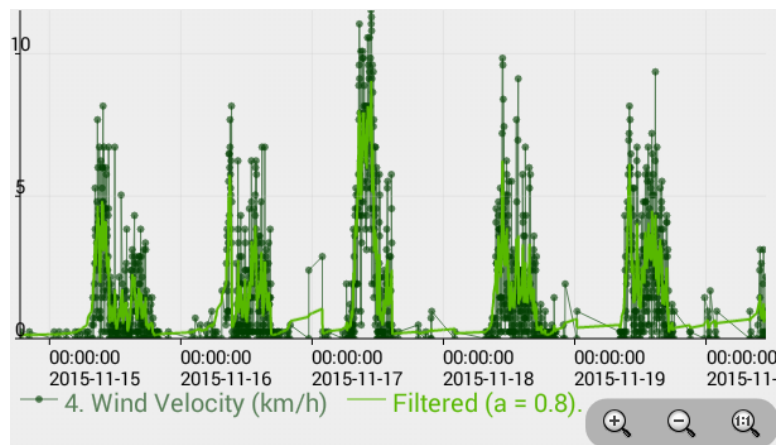


Figura 6.19: Ensaio Exterior - Velocidade do vento

Os seguintes aspetos consideram-se relevantes:

- Variações bruscas e aleatórias na direção do vento dificultam a obtenção de informação útil;
- Períodos de variação na direção do vento bem definidos ao longo do dia:
 - Início entre as 9 e 10 horas da manhã;
 - Fim entre as 15 e 16 horas;
- Retilíneas significam períodos sem novos valores (zeros não guardados na base de dados).

A Figura 6.19 ilustra o gráfico com os valores obtidos do sensor da velocidade do vento, relacionados com o tempo. Pela sua observação é possível afirmar:

- Velocidade máxima de 11.53 km/h medida no dia 17 às 10h45;

- Períodos de maior atividade dentro da janela temporal observada na direção do vento.

De seguida são apresentados os restantes gráficos constituídos pelas medições obtidas neste ensaio a verde escuro e os valores filtrados pelo mesmo método do ensaio interior a verde claro.

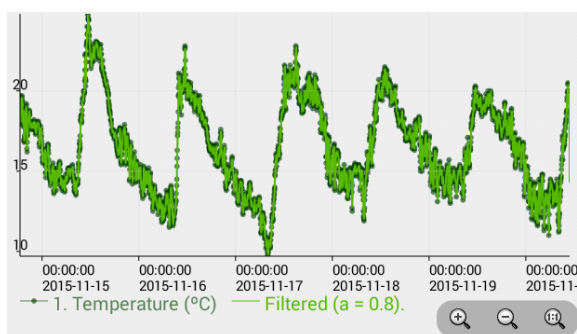


Figura 6.20: Ensaio Exterior -
Temperatura

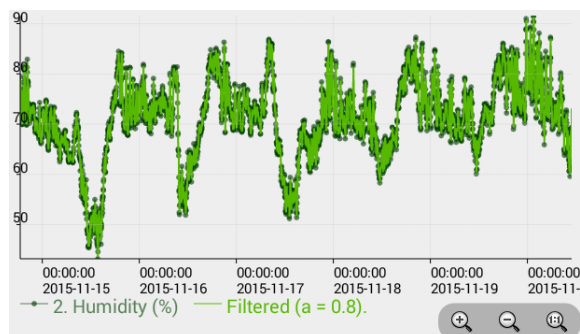


Figura 6.21: Ensaio Exterior -
Humidade

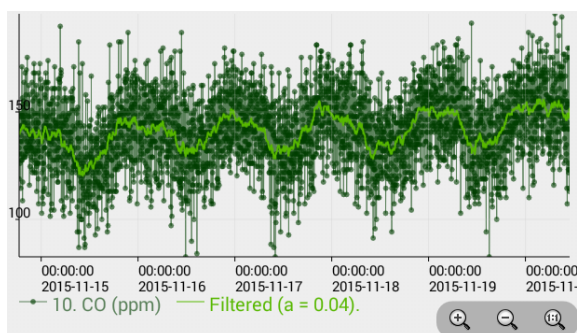


Figura 6.22: Ensaio Exterior -
Monóxido de Carbono

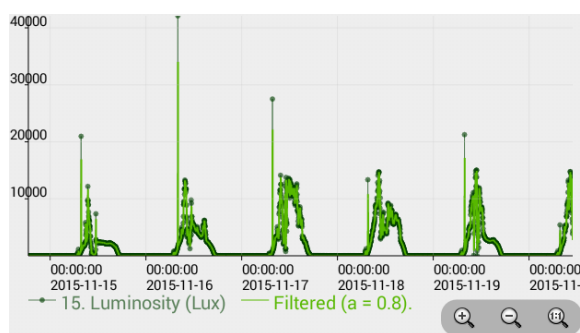


Figura 6.23: Ensaio Exterior -
Luminosidade

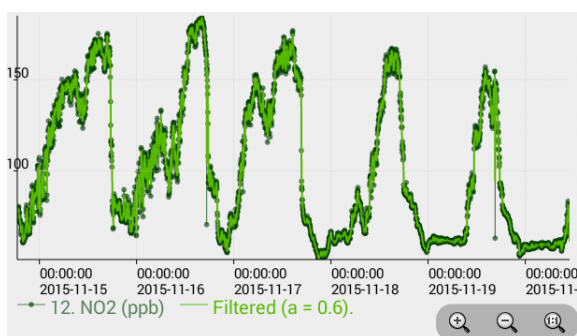


Figura 6.24: Ensaio Exterior -
Dióxido de Azoto

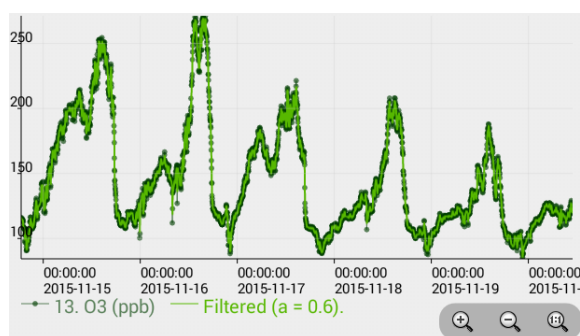


Figura 6.25: Ensaio Exterior -
Ozono

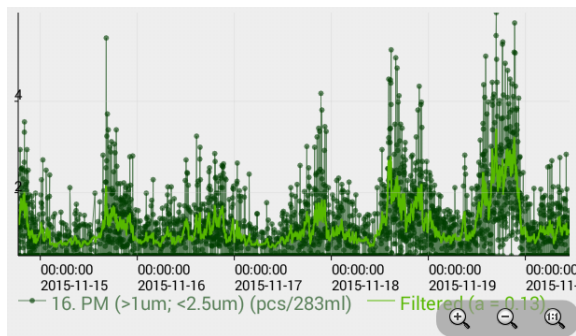


Figura 6.26: Ensaio Exterior -
PM_{2.5}

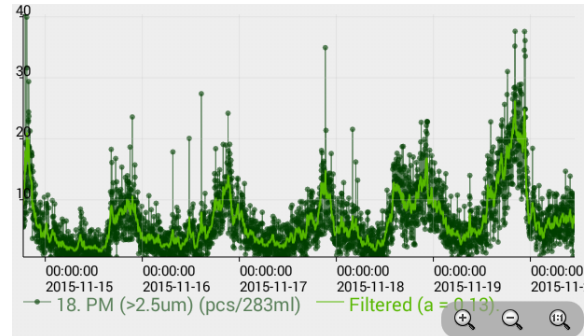


Figura 6.27: Ensaio Exterior -
PM₁₀

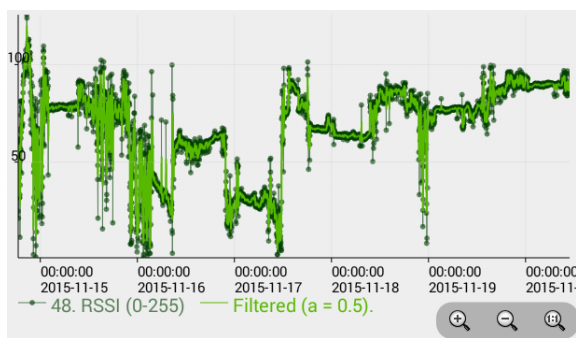


Figura 6.28: Ensaio Exterior - RSSI

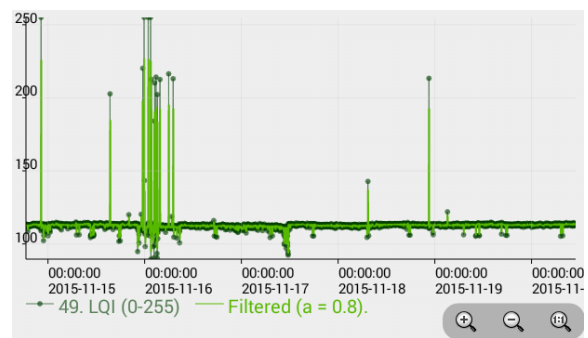


Figura 6.29: Ensaio Exterior - LQI

Os seguintes aspetos consideram-se relevantes:

- Comportamento cíclico diário em todos os sensores;
- Variações de temperatura e humidade mais bruscas e irregulares que no ensaio interior;
- Máximos relativos de concentração de CO durante a noite e mínimos relativos durante o dia;
- Máximos relativos de concentração de NO₂ e O₃ durante o dia e mínimos relativos à noite;
- Quantidade de partículas de tamanho superior a 2.5 μm muito superior às partículas de tamanho inferior;
- Sinal RSSI com muitas variações mas com um valor médio expectável.

Relativamente ao controlo da plataforma de sensores, nomeadamente de dois atuadores (atualmente simulados por LEDs), período de amostragem e controlo da alimentação da plataforma, o sistema não demonstra qualquer falha nos testes realizados. No pior dos casos, o

sistema apresenta um tempo de espera máximo de 11 segundos, contados deste o momento em que é dada a ordem de configuração a partir da aplicação móvel até à sua execução na plataforma. Neste tempo de espera máximo conta-se 5 segundos que representam o ciclo de leitura da variável de configuração mestra na base de dados, 4 segundos que representam o tempo máximo em que o Datasink está em modo *sleep* e 2 segundos para a soma de acessos HTTP ao servidor, tanto da aplicação móvel como do Gateway.

6.3 Estudo energético de um nó

A alimentação elétrica do conjunto Datasink e plataforma de sensores é constante e igual a 12V (DC). Desta forma, para a medição do consumo de corrente de um nó foi medida a queda de tensão aos terminais de uma resistência de 1Ω montada em série, entre o terminal positivo da alimentação e o resto do circuito. A Figura 6.30 ilustra o gráfico obtido através de um osciloscópio.

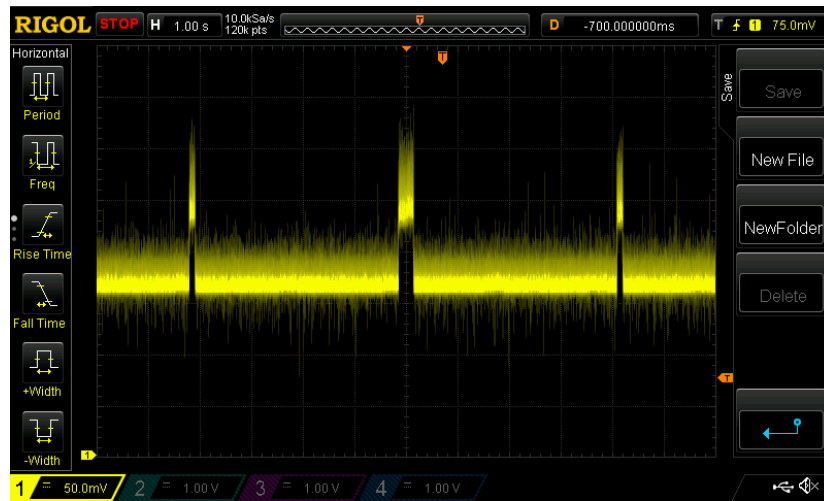


Figura 6.30: Consumo de corrente de um nó

Com o auxílio da ferramenta Matlab e sabendo que o consumo da plataforma de sensores é de $C_{plataforma} = 150mA$ constantes, obtiveram-se as seguintes médias:

- Média de corrente no ciclo de *sleep*: $I_{sleep} = 0.164 - 0.15 = 14mA$, com a duração de 4 segundos;
- Média de corrente no ciclo de *idle*: $I_{idle} = 0.3027 - 0.15 = 152.7mA$, com a duração de 0.1 segundos;
- Média de corrente no ciclo de leitura (que inclui pedido e resposta entre Datasink e plataforma, assim como o envio de dados entre Datasink e Gateway): $I_{read} = 0.3038 - 0.15 = 153.8mA$, com a duração de 0.3 segundos.

Sabendo que o ciclo de *idle* ocorre durante 4 segundos e com um período de amostragem do sistema de 230 segundos, pode-se calcular:

- Número máximo de ciclos de leitura numa hora:

$$n_{read} = \frac{60min * 60seg}{230seg} = 15.65 \equiv 16; \quad (6.1)$$

- Número de ciclos *idle* numa hora, com período de 4.1s para um ciclo *idle* e período de 4.3s para um ciclo *read*:

$$n_{idle} * 4.1 + n_{read} * 4.3 = 3600 \Leftrightarrow n_{idle} = \frac{3600 - 4.3 * n_{read}}{4.1} \Leftrightarrow n_{idle} = 862; \quad (6.2)$$

- Número de ciclos *sleep* numa hora:

$$n_{sleep} = \frac{3600 - 0.1 * 862 - 0.3 * 16}{4} = 878. \quad (6.3)$$

Assim, pode-se calcular o consumo médio parcial em mAh através de:

- $C = I * \Delta t * \frac{n_{ciclos}}{t_T}$, onde C é o consumo, I a corrente média, n_{ciclos} o número de ciclos ocorridos no tempo total (t_T , onde 1 hora = 3600 segundos) e Δt a fração de tempo ativo do ciclo;
- Consumo médio dos ciclos *idle* numa hora:

$$C_{idle} = 152.7 * 10^{-3} * 0.1 * \frac{864}{3600} \approx 3.65mA; \quad (6.4)$$

- Consumo médio dos ciclos de leitura numa hora:

$$C_{read} = 153.8 * 10^{-3} * 0.3 * \frac{16}{3600} \approx 0.21mA; \quad (6.5)$$

- Consumo médio dos ciclos de *sleep* numa hora:

$$C_{sleep} = 14 * 10^{-3} * 4 * \frac{878}{3600} = 13.66mA; \quad (6.6)$$

- Consumo médio da plataforma por hora:

$$C_{plataforma} = 150 * 10^{-3} * \frac{3600}{3600} = 150mA. \quad (6.7)$$

Assim, numa hora tem-se o consumo médio total aproximado de $C_{t1} \approx 167.52mA$. Se, por exemplo, fosse necessário utilizar uma bateria para alimentação, esta precisaria de ter pelo menos $167.6 * 24 \approx 4021mAh$ de capacidade teórica para que o sistema estivesse ligado durante um dia.

Um possível melhoramento ao sistema, a nível energético, seria ter a plataforma ligada apenas no pedido de leitura. No entanto, a ficha técnica da plataforma aconselha que esta esteja ligada pelo menos durante 60 segundos antes de medições específicas serem pedidas, nomeadamente dos sensores que precisam de pré-aquecimento. Tendo isto em conta e mantendo o período de amostragem do sistema, obteríamos os seguintes valores:

- Consumo por hora da plataforma:

$$C_{platforma} = 150 * 10^{-3} * 60 * \frac{16}{3600} = 40mA. \quad (6.8)$$

O que significa um consumo total de $Q_{t2} \approx 57.52mA$. Neste caso, a bateria do exemplo anterior teria de ter uma capacidade teórica de $57.52 * 24 \approx 1381mAh$ ou, usando a mesma bateria, o sistema permaneceria ligado durante sensivelmente 2 dias e 22 horas. Esta melhoria significaria que o nó é $\frac{C_{t1}-C_{t2}}{C_{t1}} * 100 = 65.66\%$ mais eficiente em termos energéticos.

Esta eficiência tende a aumentar quanto maior for o período de amostragem. Por exemplo, se este período for de 15 minutos (900 segundos), o consumo total do nó seria de $20.1mA$, ou seja, uma melhoria energética teórica, relativamente ao C_{t1} , de 88%.

6.4 Análise de Custos

A Tabela 6.2 apresenta os componentes essenciais do sistema desenvolvido nesta dissertação, associados ao seu custo unitário.

Componente	Custo Unitário [€]
dsPIC33FJ256MC710A	6.10
MRF24J40MA	8.1
ENC28J60	2.3
Raspberry Pi	26.39
Módulo Wi-Fi	1.78
LM2596	0.65

^a Valores mais baixos pesquisados no ali-express.com e digikey.com.

Tabela 6.2: Componentes chave e custo unitário

De acordo com os valores na tabela, o servidor tem um custo de um Raspberry Pi e um módulo Wi-Fi, ou seja, 28.17 €. Adicionalmente, um Gateway custaria 16.5 €, enquanto que um Datasink ficaria nos 14.85 €. De notar que os microprocessadores utilizados têm características muito acima do que foi necessário no âmbito deste trabalho, pelo que o custo dos micro-controladores têm a possibilidade de ficar muito menos dispendiosos, especialmente o Datasink. Desta forma, um sistema funcional com o mínimo de elementos (um Gateway, um Datasink, um servidor) teria o custo total de 59.52 €, com incrementos de 14.85 € para o crescimento da rede sem fios.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalho Futuro

7.1 Conclusão

Com a utilização da plataforma de sensores desenvolvida pela Micro I/O, foi possível desenvolver e aplicar um sistema de controlo e monitorização remota de múltiplos nós de sensores com recurso à tecnologia de comunicação MiWi, o protocolo HTTP e uma aplicação móvel.

Este sistema tem como grande vantagem a sua facilidade em ser adaptado a, potencialmente, qualquer nó de sensor ou atuador. Por sua vez, esta situação abre as portas a qualquer tipo de aplicação domótica, área onde este sistema seria bastante poderoso. Por exemplo, este sistema seria ideal num domicílio para idosos, onde comportamentos e/ou ações de risco poderiam ser monitorizadas e alguma ação de prevenção/emergência poderia ser tomada em resposta sem a necessidade da presença física de uma pessoa.

7.2 Trabalho futuro

Tendo em conta que o trabalho realizado nesta dissertação constitui um protótipo que prova a funcionalidade, robustez e potencialidade do sistema, existem inúmeros aspetos que podem ser melhorados ou melhor explorados para que o sistema possa ser considerado como produto comercializável:

- No hardware:
 - Adaptação da capacidade computacional do micro-controlador e periféricos, nomeadamente das memórias RAM e ROM e características do microprocessador, especialmente do Datasink, ao sistema desenvolvido;
 - Implementação de uma ventoinha no interior do encapsulamento da plataforma com o objetivo de melhorar a circulação de ar e desta forma diminuir o tempo de resposta a estímulos exteriores;
- No *firmware*:
 - Otimização ao nível de consumo elétrico, no sentido em que a plataforma não precisa de estar constantemente ligada para fazer medições com suficiente espaçamento temporal;

- Transformar configurável o tempo que o Datasink está em modo *sleep*;
 - Otimização ao nível de gestão da rede MiWi que a *stack* não especifique, com a realização de testes com múltiplas plataformas, tais como colisão de mensagens e estabelecimento de comunicação não direta com o coordenador;
 - Implementação de automatizações consoante informação obtida pelos sensores, com a possibilidade de configuração por parte do utilizador;
 - Implementação de mecanismos identificadores de falha de comunicação com Data-sinks;
- Na aplicação móvel:
 - Implementação de um sistema de notificações em tempo real configurável pelo utilizador final;
 - Melhoramento do aspeto gráfico;
 - Otimização do tempo de espera em comunicação com a base de dados;
 - Implementação de um sistema de exportação e envio de dados;
 - Implementação de ferramentas matemáticas e gráficas adicionais para assistência à análise de todos os dados disponíveis tais como configuração de médias, variações, tendências, funções derivadas, aplicação de filtros e limites dos gráficos.

Referências

- [1] Notícia das Nações Unidas, 10 de Julho de 2014, Nova Iorque. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html>
- [2] Procedimentos regionais de informação e alerta no âmbito da qualidade do ar - Relatório de Ambiente e Saúde (Anexo 31), Dezembro de 2010. Agência Portuguesa do Ambiente. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=90&sub2ref=202>
- [3] Relatório da Qualidade do Ar na Região Centro 2012, CCDRC. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território - Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro. Visitado a Outubro de 2015.
- [4] Definição de 'domótica', dicionário português online. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.priberam.pt/dlpo/dom%C3%B3tica>
- [5] Definição de 'domotique', dicionário francês online. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/domotique/26402>
- [6] History of Washing Machines, Mary Bells. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://inventors.about.com/od/wstartinventions/a/washingmachines.htm>
- [7] Household Appliances Timeline, Greatest Engineering Achievements of the 20th Century. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.greatachievements.org/?id=3768>
- [8] The History of Smart Homes, Abril de 2014, Drew Hendricks. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.m2mevolution.com/topics/m2mevolution/articles/376816-history-smart-homes.htm>
- [9] If You Can't Stand the Coding, Stay Out of the Kitchen: Three Chapters in the History of Home Automation; Dag Spicer, Agosto de 2000. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.drdobbs.com/architecture-and-design/if-you-cant-stand-the-coding-stay-out-of/184404040>
- [10] Revolution in Miniature: The History and Impact of Semiconductor Electronics, 2nd Edition; Ernest Braun & Stuart MacDonald, 1982. Visitado a Outubro de 2015. URL: https://books.google.pt/books?id=03c4wldf-k4C&pg=PA105&lpg=PA105&dq=first+calculator+with+single+chip&source=bl&ots=ZX9EwGRDHG&sig=RICuBxYVW2X05G_t40MzKd8zAUg&hl=pt-PT&sa=X&ei=KvyDVb2TEMzy7AagwZboAw&ved=0CEIQ6AEwBTgU#v=onepage&q=first%20calculator%20with%20single%20chip&f=false

- [11] MITS Altair 8080; Steven Stengel. Visitado a Janeiro de 2015. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://oldcomputers.net/altair-8800.html>
- [12] History of X10, Martin E-Man, Agosto de 2014. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://buildyoursmarthome.co/home-automation/protocols/x10/>
- [13] 20 years ago today, the World Wide Web opened to the public; Martin Bryant, Agosto de 2011. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://thenextweb.com/insider/2011/08/06/20-years-ago-today-the-world-wide-web-opened-to-the-public/>
- [14] “That ‘Internet of Things’ Thing”, Junho 2009, Kevin Ashton. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>
- [15] A Very Short History of the Internet of Things, Junho 2014, Gil Press. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.forbes.com/sites/gilpress/2014/06/18/a-very-short-history-of-the-internet-of-things>
- [16] Dick Tracy’s Watch: The Most Indestructible Meme in Tech Journalism; Harry McCracken, Fevereiro de 2013, Time Magazine. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://techland.time.com/2013/02/11/dick-tracys-watch-the-most-indestructible-meme-in-tech-journalism/>
- [17] The History of Bar Codes; Mary Bellis. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://inventors.about.com/od/bstartinventions/a/Bar-Codes.htm>
- [18] The Invention of the First Wearable Computer; Edward O. Thorp. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.cs.virginia.edu/~evans/thorp.pdf>
- [19] The Day the Infant Internet Uttered its First Words, Abril de 2011, Universidade de Califórnia. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.lk.cs.ucla.edu/internet_first_words.html
- [20] The ‘Only’ Coke Machine on the Internet, Universidade de Califórnia. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.cs.cmu.edu/~coke/history_long.txt
- [21] A brief history of the Internet of Things, Postscapes. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://postscapes.com/internet-of-things-history>
- [22] Internet Refrigerator: “Internet Digital DIOS“. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.telecompaper.com/news/lg-unveils-internetready-refrigerator--221266>
- [23] Smart Things - Ubiquitous Computing User Experience Design, Mike Kuniavsky, 2010. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123748997>
- [24] Wi-Fi: Who We Are. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.wi-fi.org/who-we-are>
- [25] History of Wireless Local Area Networks (WLANs) in the Unlicensed Bands, Kevin J. Negus e Al Petrick, membros do IEEE. Visitado a Outubro de 2015. URL http://iep.clemson.edu/wp-content/uploads/2009/08/WLAN_History_Paper.pdf

- [26] The ZigBee Alliance. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.zigbee.org/zigbeealliance/>
- [27] The Z-Wave Alliance - Overview. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://z-wavealliance.org/z-wave-alliance-overview/>
- [28] Enciclopedia On-line, Cisco Systems Inc. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.encyclopedia.com/topic/Cisco_Systems_Inc.aspx
- [29] The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet, by Dave Evans, Abril de 2011. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- [30] The Hammersmith Group. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.thehammersmithgroup.com/>
- [31] "Internet of Things Definitions". Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://postscapes.com/internet-of-things-definition>
- [32] Nest - Meet the Nest Thermostat. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://nest.com/thermostat/meet-nest-thermostat/>
- [33] Stack Lighting homepage. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://stacklighting.com/>
- [34] Ex-Tesla and NASA Engineers Make a Light Bulb That's Smarter Than You, by Margaret Rhodes, Setembro 2014. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.wired.com/2014/09/ex-tesla-nasa-engineers-make-light-bulb-thats-smarter/>
- [35] Stack Alba: automation of lighting – it's simple, Setembro de 2014. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://gadget-help.com/stack-alba-automation-of-lighting-its-simple/>
- [36] WeMo Insight Switch, Belkin, UK webpage. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.belkin.com/uk/p/P-F7C029/>
- [37] WeMo Insight Switch, Belkin, DE webpage. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.belkin.com/de/p/F7C029ak/>
- [38] About Efergy, by Efergy. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://efergy.com/eu/contact/>
- [39] Efergy Engage Wireless Energy Monitor Review, from The Gadgeteer, by Bill Kuch, Agosto de 2013. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://the-gadgeteer.com/2013/08/05/efergy-engage-wireless-energy-monitor-review/>
- [40] Scout Hub, Scout Alarms. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.scoutalarm.com/shop/scout-hub>
- [41] Connected -to everything- home security, Scout Alarm. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.scoutalarm.com/integrations/ifttt>

- [42] What's Going on With Scout? - Security Gem, Marco de 2014. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://securitygem.com/whats-going-scout/>
- [43] Air Pollution Has Been a Problem Since the Days of Ancient Rome, Fevereiro de 2013, Joseph Stromberg. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.smithsonianmag.com/history/air-pollution-has-been-a-problem-since-the-days-of-ancient-rome-3950678/>
- [44] History of Pollution, Pollution Issues. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.pollutionissues.com/Fo-Hi/History.html>
- [45] Definição de Aerossóis, Infopédia online. Visitado a Julho de 2015. URL: [http://www.infopedia.pt/\\$aerossol](http://www.infopedia.pt/$aerossol)
- [46] An Introduction to Air Pollution – Definitions, Classifications, and History; Aaron Daly e Paolo Zannetti - The EnviroComp Institute, Fremont, CA (USA). Visitado a Julho de 2015. URL: <http://www.envirocomp.org/j/books/chapters/1aap.pdf>
- [47] Particulate Matter (PM), EPA. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.epa.gov/pm/>
- [48] Indoor Air Pollution Worse Than Outdoor, Josh Axe. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://draxe.com/indoor-air-pollution-worse-than-outdoor/>
- [49] Indoor Air Quality - Conclusions and recommendations, GreenFacts. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://copublications.greenfacts.org/en/indoor-air-pollution/1-3/10-conclusions.htm>
- [50] The Inside Story: a Guide to Indoor Air Quality, EPA. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.epa.gov/iaq/pubs/insidestory.html#Intro1>
- [51] Common Indoor Air Pollutants: Sources and Health Impacts, Agosto de 2000, Linda Adler, Universidade de Kentucky. Visitado a Julho de 2015. URL: <http://www2.ca.uky.edu/hes/fcs/FACTSHTS/HF-LRA.161.PDF>
- [52] A Citizen's Guide to Radon, EPA. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.epa.gov/radon001/pubs/citguide.html#howdoes>
- [53] Series 500 - Portale Indoor Air Quality Monitor, Aeroqual. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.aeroqual.com/product/series-500-portable-indoor-monitor>
- [54] AQ PRO Indoor Air Quality Monitor, E-Instruments. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.e-inst.com/environmental-iaq/products-AQ-Pro>
- [55] AQ Expert Indoor Air Quality Monitor, E-Instruments. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.e-inst.com/environmental-iaq/products-AQ-Expert>
- [56] Air Quality Guidelines for Europe, 2nd Edition, World Health Organization, Regional Publications, European Series, No 91, 2000. Visitado a Julho de 2015. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf

- [57] Air Quality Guidelines Global Update 2005 - Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, World Health Organization, 2005. Visitado a Julho de 2015. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf
- [58] Parts Per Million (ppm) Online Converter, Lenntech. Visitado a Outubro de 2015. <http://www.lenntech.com/calculators/ppm/converter-parts-per-million.htm>
- [59] Alima: the smart indoor air quality monitor for your home, INDIEGOGO crowdfund-funding campaign. Visitado a Julho de 2015. URL <https://www.indiegogo.com/projects/alima-the-smart-indoor-air-quality-monitor-for-your-home#/story>
- [60] Alima Aims To Tell You When Your Air is Harmful, Janeiro de 2014, Darrel Etherington. Visitado a Julho de 2015. URL: <http://techcrunch.com/2014/01/08/alima-aims-to-tell-you-when-your-air-is-harmful-and-prevent-it-from-ever-getting-there/>
- [61] Nest, Nest Lab. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <https://nest.com/>
- [62] Nest Protect system requirements and technical specifications, Nest Lab. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <https://nest.com/support/article/Nest-Protect-system-requirements-and-technical-specifications>
- [63] Nest Protect review, Março de 2014, Lindsey Turrentine, CNET. Visitado a Julho de 2015. URL: <http://www.cnet.com/products/nest-protect/>
- [64] Roost, Bateria Inteligente. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.smartroost.net/>
- [65] Roost's new battery brings mobile brains to old smoke detectors, Novembro 2014, Andrew Gebhart, CNET. Visitado a Julho de 2015. URL: <http://www.cnet.com/products/roost-smart-battery/>
- [66] Wally: Water leaks, humidity and temperature sensor. Visitado a Janeiro de 2015. Visitado a Julho de 2015. URL: <http://www.wallyhome.com/>
- [67] SNUPI: Sensor Nodes Utilizing Powerline Infrastructure; Gabe Cohn, Erich Stuntebeck, Jagdish Pandey, Brian Otis, Gregory D. Abowd, Shwetak N. Patel; Universidade de Washington e Instituto de Tecnologia de Georgia. Visitado a Janeiro de 2015. URL: http://www.gabeacohn.com/pdf/Cohn_SNUPI_ubicomp10.pdf
- [68] Regulatory Considerations of Lower Cost Air Pollution Sensor Data Performance, de Robert Judge e Richard A. Wayland. Visitado a Outubro de 2015. <http://www2.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/regulatoryconsiderationslowercostairpollutionsensordatapformance.pdf>
- [69] European Network on New Sensing Technologies for Air-Pollution Control and Environmental Sustainability. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.eunetair.it/>
- [70] A guide to the confusing Internet of Things standards world, Colin Neagle, Julho de 2014. Visitado Outubro de 2015. URL: <http://www.networkworld.com/article/2456421/internet-of-things/a-guide-to-the-confusing-internet-of-things-standards-world.html>

- [71] The OSI Model: An Overview. Rachelle L. Miller, SANS Institute. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers/standards/osi-model-overview-543>
- [72] BUTLER Project Overview, uBiquitous, secUre inTernet-of-things with Location and contEx-awaReness. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.iot-butler.eu/>
- [73] Quality of Service Design Overview - QoS Requirements of Video, Tim Szigeti and Christina Hattingh, Cisco Systems, Dezembro de 2014. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=357102&seqNum=2>
- [74] Requirements of Quality of Service in Wireless Sensor Network; Yuanli Wang, Xianghui Liu, Jianping Yin. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.researchgate.net/publication/4240501_Requirements_of_Quality_of_Service_in_Wireless_Sensor_Network
- [75] Functions of LLC and MAC sub-layers of Data Link Layer, Computer Networking Demystified. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://computernetworkingsimplified.com/data-link-layer/components-data-link-layer-llc-mac/>
- [76] The Low Energy Technology Behind Bluetooth Smart, Technical Information, Bluetooth SIG. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy-tech-info.aspx>
- [77] Bluetooth 4.0: An introduction to Bluetooth Low Energy - Part 1. Mikhail Galeev, Z-Focus Consulting, July 2011. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278927
- [78] Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An emerging low-power wireless technology. Carles Gomez, Joaquim Oller and Josep Paradells, Universitat Politècnica de Catalunya, published at August 2012. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3478807/>
- [79] Microchip Wireless (MiWi™) Media Access Controller – MiMAC, AN1283, Microchip. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01283a.pdf>
- [80] Microchip MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack, AN 1066, Microchip. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN1066%20-%20MiWi%20App%20Note.pdf>
- [81] Throughput and Delay Analysis of Unslotted IEEE 802.15.4; Benoît Latré, Pieter De Mil, Ingrid Moerman, Bart Dhoedt and Piet Demeester, Ghent University – IBBT – IMEC. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://academypublisher.com/jnw/vol01/no01/jnw01012028.pdf>
- [82] IEEE 802.11g Wi-Fi Tutorial, Ian Poole, Radio Electronics. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11g.php>
- [83] The New Mainstream Wireless LAN Standard, Broadcom. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.dell.com/downloads/global/shared/broadcom_802_11_g.pdf

- [84] The Problem With Home Automation's Internet of Things; Setembro de 2013, Patrick Moorhead. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.forbes.com/sites/patrickmoorhead/2013/09/26/the-problem-with-home-automations-iot/>
- [85] The dumb state of the smart home; Janeiro de 2014, Jacob Kastrenakes. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.theverge.com/2014/1/24/5336104/smart-home-standard-are-a-mess-zigbee-z-wave>
- [86] SmartThings Hub, Description and Specifications; SmartThings. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <https://shop.smartthings.com/#!/products/smartthings-hub>
- [87] 5 Things You Can Do With Home Automation and IFTTT; Setembro de 2014. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://securitygem.com/5-things-you-can-do-with-home-automation-and-ifttt/>
- [88] Vocabulário Internacional de Metrologia - Guia ISO/IEC 99 3ª Edição; Novembro de 2008, Instituto Português da Qualidade. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.ipq.pt/backFiles/VIM.pdf>
- [89] Sensors and Signal Conditioning, 2nd Edition; 2001, Ramon Pallàs-Areny & John G. Webster.
- [90] Sensor Technology Handbook; 2005, Jon Wilson.
- [91] Thermocouple General Specifications; Ultra Electronics, Nuclear Sensors & Process Instrumentation. Visitado a Janeiro de 2015. URL: http://ultra-nspi.com/product_groups/industrial/thermo_pdfs/TC-GEN%20SPECS.pdf
- [92] What is a Thermocouple?; REOTEMP Instrument Corporation. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.thermocoupleinfo.com/>
- [93] ANSI Exposed Junction Thermocouple PFA Insulated Mini Plug, Labfacility. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.labfacility.com/ANSI-Exposed-Junction-Thermocouple-PFA-Insulated-Mini-Plug-p315-pg340/>
- [94] Measurement and Instrumentation Principles; 2001, Alan S. Morris.
- [95] Sensors and Transducers, Third edition; 2001, Ian R. Sinclair.
- [96] NTC Disc Thermistors Datasheet, AVX. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/86133.pdf>
- [97] Resistance Temperature Detectors (RTDs), Measurement Specialties. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://precisionsensors.meas-spec.com/rtd.asp>
- [98] Datasheet - P0K1.202.3K.A.010 RTD Sensor, IST Inovative Sensor Technology. Visitado a Janeiro de 2015. <http://www.farnell.com/datasheets/1643994.pdf>
- [99] Introduction to Semiconductor Temperature Sensors, Capgo Pty Ltd. Visitado a Janeiro de 2015. <http://www.capgo.com/Resources/Temperature/Semiconductor/Semi.html>
- [100] LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors Datasheet; 2013, Texas Instruments. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

- [101] Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review; Hamid Farahami, Rahman Wagiran and Mohd Hamidon; MDPI - Sensors Open Access Journal. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/5/7881/pdf>
- [102] Humidity/Moisture - Choosing a Humidity Sensor: A Review of Three Technologies; Denes Roveti, Julho de 2001; Sensors Online. Visitado a Janeiro de 2015. <http://www.sensorsmag.com/sensors/humidity-moisture/choosing-a-humidity-sensor-a-review-three-technologies-840>
- [103] P14 - FemtoCap Capacitive Humidity Sensor, Datasheet, Innovative Sensor Technology. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/484563.pdf>
- [104] HCZ-D5-A Humidity Sensor, Multicomp. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://pt.farnell.com/multicomp/hcz-d5-a/sensor-humidity-20-90-rh--5/dp/1891428>
- [105] Datasheet: HCZ-D5-A Humidity Sensor, Multicomp. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/1355476.pdf>
- [106] Electromagnetic Waves and the Electromagnetic Spectrum by Ian Poole. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.radio-electronics.com/info/propagation/em_waves/electromagnetic-waves-spectrum.php
- [107] Radiometry and Photometry; Oxford Instruments company. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.andor.com/learning-academy/radiometry-and-photometry-an-overview-of-the-science-of-measuring-light>
- [108] Electromagnetic Radiation and Radio Waves, Woodbank Communications Ltd. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.mpoweruk.com/radio.htm>
- [109] Designer's Notebook, Ambient Light Sensors (ALS) by Joe Smith, Texas Advanced Optoelectronic Solutions, 2009
- [110] Handbook of Modern Sensors - Physics, Design and Applications, 3th Edition, Jacob Fraden
- [111] Human photopic response; Wikimedia Commons. Visitado a Janeiro de 2015. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_photopic_response.jpg
- [112] Future Electronics. Visitado a Junho de 2015. URL: <http://uk.futureelectronics.com/en/Pages/index.aspx?OL=GB&Language=en-GB>
- [113] Integrated Digital Light Sensor datasheet (ISL29035); Intersil. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/isl2/isl29035.pdf>
- [114] Fototransistor TEPT4400 Datasheet, Vishay. <http://www.vishay.com/docs/81341/tept4400.pdf>
- [115] Light Dependent Resistor, Photoresistor, or Photocell, by Ian Poole. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.radio-electronics.com/info/data/resistor/ldr/light_dependent_resistor.php

- [116] Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, 3rd Edition, by Donald A. Neamen, University of New Mexico, 2003.
- [117] Excelitas Tech VT90N2, LDR. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://pt.farnell.com/excelitas-tech/vt90n2/ldr-0-5mohm-80mw-series-vt900/dp/1652637>
- [118] Electronic gas sensors and detectors - classification and operating principles, Electronics-Base, Agosto de 2012. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.electronics-base.com/general-description/gas-sensors/171-electronic-gas-sensors-and-detectors-clasification-and-operating-principles>
- [119] Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications, 4th Edition, Jacob Fraden; Capítulo 17 Chemical Sensors. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://folk.ntnu.no/andberge/Sensors.pdf>
- [120] International Sensor Technology - Chapter 2; Electrochemical Sensors. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.intlsensor.com/pdf/electrochemical.pdf>
- [121] Nemoto NAP505 datasheet, Nemoto Sensor Engineering Company Ltd. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.nemoto.eu/nap-505-manual.pdf>
- [122] Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring, George F. Fine, Leon M- Cavanagh, Ayo Afonja e Russel Binions. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0CDYQFjAGahUKEwiunvTf3urIAhUCxhoKHwtZAOM&url=http%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1424-8220%2F10%2F6%2F5469%2Fpdf&usg=AFQjCNH5vTF1xBUPmhabjBZGobxTMutEsg&sig2=8bPQuHP4HsDJ19NfBtiCkA&bvm=bv.106379543,d.d2s&cad=rja>
- [123] Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications, 4th Edition, Jacob Fraden; Capítulo 17 Chemical Sensors, página 574. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://folk.ntnu.no/andberge/Sensors.pdf>
- [124] MiCS-2614 O3 Sensor Datasheet, e2V. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://datasheet.octopart.com/MICS-2614-E2V-datasheet-8615830.pdf>
- [125] System-Connected Carbon Monoxide Detectors; 2012, System Sensor. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.systemsensor.com/en-us/documents/system-connected_co_detector_app_guide_coag103.pdf
- [126] Carbon monoxide detectors, Chris Woodford, a Maio de 2014. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.explainthatstuff.com/carbonmonoxidedetectors.html>
- [127] Safety & Security - Carbon Monoxide Detector, by Defined Electric. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://definedelectric.com/safety-security-carbon-monoxide-detector/>
- [128] Quantum Eye CO Detector. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.aerohire.co.nz/pilotshop/monoxide_detector_18_mo.html

- [129] Particle size-dependent radical generation from wildland fire smoke, Stephen S. Leonard, Vince Castranova , Bean T. Chen, Diane Schwegler-Berry, Mark Hoover, Chris Piacitelli, Denise M. Gaughan, Abril de 2007. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.wildlandfire.com/docs/2008/safe/leonard-article.pdf>
- [130] Smoke, Gas & Flame Detectors - Principle of Operation; FireWize. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://firewize.com/smoke-gas-flame-fire-detectors-principle-operation>
- [131] How Smoke Detectors Work; Marshall Brain. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://home.howstuffworks.com/home-improvement/household-safety/fire/smoke2.htm>
- [132] Discontinuation of ionization smoke detectors, April 23, 2015, System Sensor. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.approvedprotection.com/discontinuation-of-ionization-smoke-detectors/>
- [133] How photoelectric smoke detectors work; Enggcyclopedia. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://www.enggcyclopedia.com/2011/11/photoelectric-smoke-detectors-work/>
- [134] Particle Sensor Model PPD42NS, Shinyei. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.sca-shinyei.com/pdf/PPD42NS.pdf>
- [135] Basic Guide to Particle Counters and Particle Counting; Fevereiro de 2013, Particle Measuring Systems. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.pmeasuring.com/wrap/filesApp/BasicGuide/file_1/ver_1317144880/basicguide.pdf
- [136] Smoke Detectors: Ionization vs Photoelectric; GreyStone. Visitado a Janeiro de 2015. URL: http://www.greystoneenergy.com/webcura/files/244980_tt067.pdf
- [137] Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 7th Edition 2008, by World Meteorological Organization. Visitado a Outubro de 2015. URL: https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf
- [138] Anemometer, by Saylor Academy. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2011/04/Anemometer.pdf>
- [139] ADS-WS1 Weather Station Anemometer, Argent Data Systems. Visitado a Outubro de 2015. URL: https://www.argentdata.com/catalog/product_info.php?products_id=175
- [140] Weather Sensor Assembly p/n 80422 datasheet, Argent Data Systems. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/Weather%20Sensor%20Assembly..pdf>
- [141] Marine Wind Monitor Model 05106, R. M. Young Company. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.youngusa.com/products/11/8.html>
- [142] Área educativa - Udómetro, Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=ema.udom.xml>

- [143] ADS-WS1 Weather Station Rain Gauge, Argent Data Systems. Visitado a Outubro de 2015. URL: https://www.argentdata.com/catalog/product_info.php?products_id=168
- [144] What is INSTEON; Ron Fritz. Visitado a Janeiro de 2015. URL: <http://compnetworking.about.com/od/homeautomationinsteon/a/what-is-insteon.htm>
- [145] INSTEON - Whitepaper: The Details, 2013. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.insteon.com/pdf/insteondetails.pdf>
- [146] EngineersGarage - ZigBee TEchnology, Anshul Thakur. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.engineersgarage.com/articles/what-is-zigbee-technology?page=2>
- [147] Nimbits homepahe. Visitado a Junho de 2015. URL: <http://nimbits.com/index.jsp>
- [148] Preço de MRF24J40MA, Microchip Direct. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.microchipdirect.com/ProductDetails.aspx?Category=MRF24J40MA>
- [149] MRF24J40MC Datasheet, Microchip. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/75002A.pdf>
- [150] BGM111 Datsheet, Silicon Labs. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Silicon%20Laboratories%20PDFs/BGM111%20Datasheet.pdf>
- [151] Preço de BGM111, DigiKey. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.digikey.com/product-detail/en/BGM111A256V1R/336-3326-2-ND/5347580>
- [152] WT51822 Datasheet, Wireless-Tag. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.wireless-tag.com/Public/upload/file/p1a1uuca1hb8a70n90u1k1tc1dam3.pdf>
- [153] Preço de WT51822, AliExpress. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://pt.aliexpress.com/store/product/New-Arrival-Mini-Serial-Communication-Module-bluetooth-WT51822-S4AT/1784058_32421586064.html?storeId=1784058
- [154] Wireless-Tag Introduction to WT51822, Wireless-Tag. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.wireless-tag.com/index.php/Product/dis/26.html>
- [155] Espressif Smart Connectivity Platform: ESP8266, Datasheet, Espressif Systems. Visitado a Outubro de 2015. URL: https://nurdspace.nl/images/e/e0/ESP8266_Specifications_English.pdf
- [156] Preço de ESP8266, Sparkfun. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://www.sparkfun.com/products/13678>
- [157] Throughput testing of ESP8266 module, Zone Robotics, Junho de 2015. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://zonerobotics.com/wordpress/?p=456>
- [158] ESP8266 Distance Testing, Brian Benchoff, Setembro de 2014. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://hackaday.com/2014/09/26/esp8266-distance-testing/>

- [159] Ethernet TCP/IP Source Code Driver; IBEX. Visitado a Junho de 2015. URL: <http://www.embedded-code.com/manuals/ethernet-tcp-ip-driver/category/driver-overview>
- [160] AChartEngine home page. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.achartengine.org/>
- [161] Groove Dust Sensor Demo, Seeed. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.seeedstudio.com/wiki/Grove_-_Dust_Sensor
- [162] MRF24J40 Data Sheet, Microchip. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39776C.pdf>
- [163] Impact of Air Temperature on Relative Humidity - A study, Sheeba Valsson and Dr. Alka Bharat. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.coa.gov.in/mag/Feb11-Pdf%20file%20of%20website/Sheeba%20Valsson-pg38-41.pdf>
- [164] Professional Android Sensor Programming, Greg Milette e Adam Stroud, Capítulo 6. Visitado a Outubro de 2015. URL: <https://books.google.pt/books?id=dZjo-254FucC&pg=PA108&lpg=PA108&dq=smoothing+sensor+data+simple+low+pass+filter&source=bl&ots=m3dTMxjF4n&sig=q-PuxTCLp-09uYaftLA1dn0PIwA&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwi-qNbD7K3JAhULaRQKHf-CDQYQ6AEITzAG#v=onepage&q=smoothing%20sensor%20data%20simple%20low%20pass%20filter&f=false>
- [165] Aveiro, Portugal - Sunrise, sunset, dawn and dusk times, table. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.gaisma.com/en/location/aveiro.html>
- [166] Basic Guide to Particle Counters and Particle Counting, by Particle Measuring Systems, Fevereiro de 2013. Visitado a Outubro de 2015. URL: http://www.pmeasuring.com/wrap/filesApp/BasicGuide/file_1/ver_1317144880/basicguide.pdf
- [167] Workplace aerosol mass concentration measurement using optical particle counters - Abstract, by Görner P., Simon X., Bémer D. and Lidén G. Visitado a Outubro de 2015. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22009365>

Anexo A: Identificação dos elementos do sistema na implementação real

A Figura 7.1 ilustra a plataforma de sensores utilizada para os ensaios. Identificam-se, adicionalmente, os seguintes pontos:

- 1: Sensor de velocidade do vento;
- 2: Sensor de direção do vento;
- 3: Sensor de precipitação;
- 4: Encapsulamento protetor dos restantes sensores (temperatura, humidade, Monóxido de Carbono, Dióxido de Azoto, Ozono e Partículas);
- 5: Circuito para o controlo da alimentação da plataforma;
- 6: MCU da plataforma de sensores;
- 7: Datasink.



Figura 7.1: Instalação da Plataforma de Sensores.

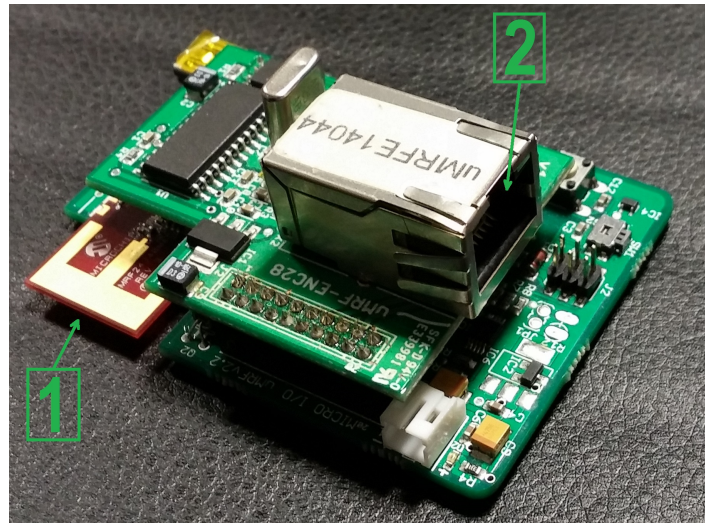


Figura 7.2: Micro-controlador como Gateway.

A Figura 7.2 ilustra o Gateway, composto pelo módulo μ MRF. Adicionalmente, identifica-se ainda na imagem:

- (1) - Transcetor da Microchip;
- (2) - Módulo ENC28J60.

Anexo B: Linhas de tendência dos sensores

Cálculo da linha de tendência para o CO:

Como observado na Figura 7.3, a resposta do sensor à concentração de CO é linear. Devido a eletrônica de acondicionamento de sinal na plataforma desenvolvida pela Micro I/O, o valor recebido vem de uma ADC de 16 bits com um ganho de 3, cuja a entrada é um sinal com excursão 230 mV, entre os 0.4 e 0.63 mV. Fazendo $0.4 * 3 = 1.2$ e $0.63 * 3 = 1.89$, obtém-se $p_1 = (1.2, 0)$, $p_2 = (1.89, 10000)$ e $y = m * x + b$, temos:

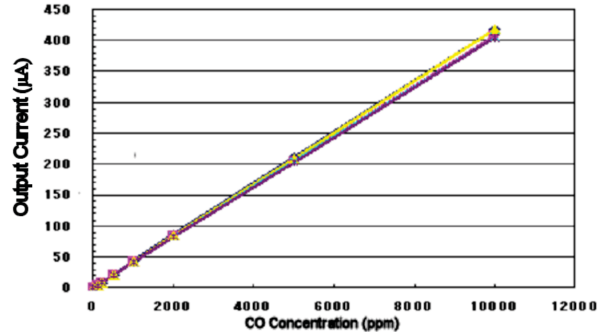


Figura 7.3: Resposta do sensor.

$$\begin{cases} 0 = m * 1.2 + b \\ 10000 = m * 1.89 + b \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} b = -m * 1.2 \\ m = \frac{10000}{1.89 - 1.2} \end{cases} \quad (7.1)$$

Resolvendo, obtemos $y = 14492.7536 * x - 17391.3044$, onde y é a concentração de CO e x o valor lido pela ADC.

Cálculo da linha de tendência para o NO₂:

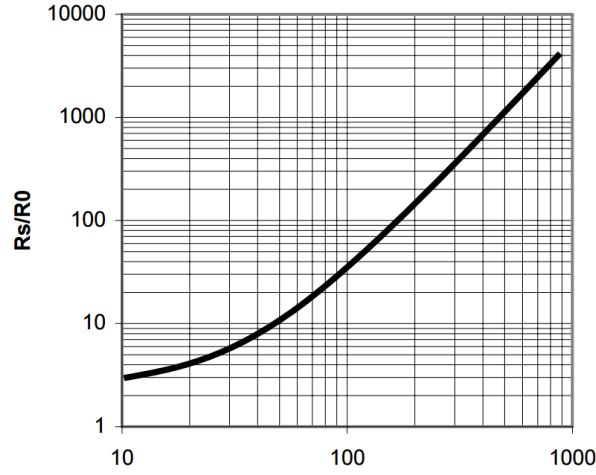


Figura 7.4: Resposta do sensor.

Como observado na Figura 7.4, a resposta do sensor à concentração de NO₂ é logarítmica. Sabe-se que o sensor foi montado em série com uma resistência de 330kΩ e que o valor lido pela ADC é a tensão ao seu terminal positivo. A resistência R_S é dada por $R_S = \frac{330k * V_{out}}{2.5 - V_{out}}$, onde V_{out} é o valor lido da ADC.

Adicionalmente, foi considerado para a resistência do ar o valor típico de 11kΩ.

Tendo em conta que:

$$y = a * x^k \Leftrightarrow \log(y) = k * \log(x) + \log(a) \text{ obtendo-se } Y = mX + b, \text{ com}$$

$$\begin{cases} m = \frac{\log(Y_2 - Y_1)}{\log(X_2 - X_1)} \\ b = Y - mX; \end{cases} \quad (7.2)$$

onde $k = m$ e $a = 10^b$.

Com os pontos $p_1 = (100, 400)$ e $p_2 = (900, 4000)$ obtém-se $k = 2.1567$ e $a = 0.0017$. Com a função inversa de $y = 0.0017 * x^{2.1567}$ temos a função de conversão da concentração de NO₂ em $y = 19.2334 * x^{0.4637}$, onde x é $\frac{R_S}{R_0}$ e y a concentração de NO₂.

Cálculo da linha de tendência para o O_3 :

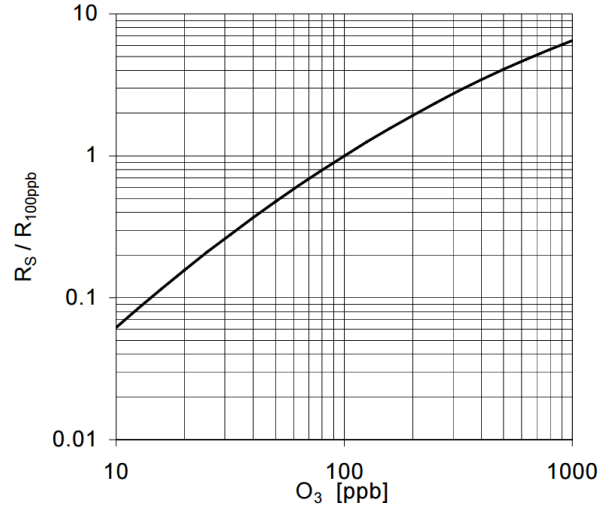


Figura 7.5: Resposta do sensor.

Como se pode observar na Figura 7.5, este sensor tem uma resposta logarítmica à concentração de O_3 . Este sensor foi ligado em série com uma resistência de $33k\Omega$ e o valor lido pela ADC é a tensão no seu terminal positivo. De forma análoga ao cálculo anterior, usou-se os pontos $p_1 = (60, 06)$ e $p_2 = (500, 4)$ e obteve-se $y = 106.196(\frac{R_s}{R_{100}})^{1.1176}$.

Considerou-se um $R_{100} = 33k\Omega$, visto que a utilização de laboratório para cálculo da resistência do sensor a 100 ppb está fora de âmbito desta dissertação.